FITOTECNIA

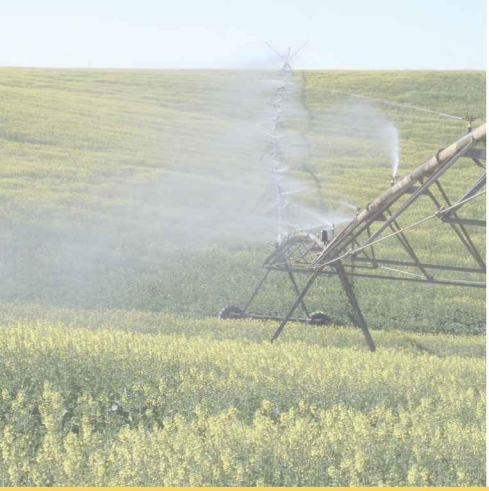
Principios de agronomía para una agricultura sostenible

FRANCISCO J. VILLALOBOS MARTÍN
ELÍAS FERERES CASTIEL

MP

FITOTECNIA

Principios de agronomía para una agricultura sostenible



FITOTECNIA

Principios de agronomía para una agricultura sostenible

FRANCISCO J. VILLALOBOS MARTÍN
ELÍAS FERERES CASTIEL

MP

Ediciones Mundi-Prensa
C/ Velázquez, 31, 3º dcha.
28001 Madrid (España)
Tel. (+34) 902 995 240
Fax (+34) 914 456 218
clientes@paraninfo.es

© 2017 de textos: Francisco J.Villalobos Martín y Elías Fereres Castiel
© 2017 de la edición: Ediciones Mundi-Prensa

Editora: Isabel Hernández Úbeda
Maquetación: Asturlet

Todos los derechos reservados

La edición original de esta obra ha sido publicada en inglés con el título
Principles of Agronomy for Sustainable Agriculture
por Francisco Villalobos y Elias Fereres
Copyright © Springer International Publishing Switzerland 2017. All Rights Reserved.

Imprime: Gráficas Summa (Llanera, Asturias)
ISBN: 978-84-8476-524-0
Depósito legal: M-12280-2017

(14714)

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra sólo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley. Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos, www.cedro.org) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra.

Impreso en España / Printed in Spain

Autores

Francisco J. VILLALOBOS
Instituto de Agricultura Sostenible (CSIC) & Universidad de Córdoba, España
Alameda del Obispo s/n, 14004 Córdoba, España
fvillalobos@uco.es

Elias FERERES
Instituto de Agricultura Sostenible (CSIC) & Universidad de Córdoba, España
Alameda del Obispo s/n, 14004 Córdoba, España
ag1fecae@uco.es

Victor O. SADRAS
South Australian Research and Development Institute
Waite Campus, Australia
victor.sadras@sa.gov.au

Pablo J. ZARCO-TEJADA
Instituto de Agricultura Sostenible (CSIC)
Alameda del Obispo s/n, 14004 Córdoba, España
pablo.zarco@csic.es

José A. GÓMEZ.
Instituto de Agricultura Sostenible (CSIC)
Alameda del Obispo s/n, 14004 Córdoba, España
e-mail: joseagomez@ias.csic.es

Miguel QUEMADA
ETS de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas, Universidad Politécnica de Madrid
Av. Puerta de Hierro, nº 2 28040 Madrid
miguel.quemada@upm.es

Helena GÓMEZ-MACPHERSON
Instituto de Agricultura Sostenible (CSIC)
Alameda del Obispo s/n, 14004 Córdoba, España
hgomez@cica.es

Francisco ORGAZ
Instituto de Agricultura Sostenible (CSIC)
Alameda del Obispo s/n, 14004 Córdoba, España
orgaz@ias.csic.es

Luciano MATEOS
Instituto de Agricultura Sostenible (CSIC)
Alameda del Obispo s/n, 14004 Córdoba, España
luciano.mateos@ias.csic.es

Luca TESTI
Instituto de Agricultura Sostenible (CSIC)
Alameda del Obispo s/n, 14004 Córdoba, España
lucatesti@ias.csic.es

J. Paulo DE MELO-ABREU
DCEB, ISA & LEAF, U Lisboa
Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisboa, Portugal
jpabreu@isa.ulisboa.pt

Antonio DELGADO
Dpto. Ciencias Agroforestales, ETSIA, Universidad de Sevilla, España
Ctra Utrera km 1, 41013 Sevilla, España
adelgado@us.es

Sobre los autores

Francisco J. VILLALOBOS es Catedrático de Agronomía de la Universidad de Córdoba, España. Obtuvo su doctorado en la Universidad de Córdoba y luego trabajó como post-doctoral en el grupo de Joe T. Ritchie en Michigan State University. Su enseñanza se ha centrado principalmente en agronomía y en modelos de simulación de cultivos. Su investigación en el Instituto de Agricultura Sostenible (IAS-CSIC) se ha dedicado a los modelos de simulación de cultivos (girasol, olivo) y a la agrometeorología (evapotranspiración, balance hídrico). Ha sido Editor-in-Chief del European Journal of Agronomy durante diez años.

Elías FERERES es Catedrático de Agronomía de la Universidad de Córdoba, España. Estudió ingeniería agronómica en la Universidad Politécnica de Madrid y se doctoró en la Universidad de California, Davis, donde trabajó durante seis años más. Su enseñanza se ha dedicado a la agronomía, las relaciones hídricas y el riego. Su investigación en el IAS-CSIC ha cubierto varios aspectos de la agricultura bajo condiciones de escasez de agua y a la gestión del riego. En la actualidad es Chief Editor de la revista Irrigation Science, y presidente de la Real Academia de Ingeniería de España.

Agradecimientos

Apreciamos enormemente la ayuda de Carmen Ruz y José Luis Vázquez en la preparación de las figuras y tablas del libro. También nos gustaría dar las gracias a la Universidad de Córdoba y al Instituto de Agricultura Sostenible (IAS-CSIC) por apoyar nuestras actividades de enseñanza e investigación que sirvieron de base para este libro. Agradecemos mucho la contribución de los colegas que han contribuido a la redacción de capítulos específicos. Centenares de nuestros estudiantes con sus preguntas y sugerencias a lo largo de muchos años han ayudado en gran medida en el perfeccionamiento de la estructura y contenido del libro. Hemos tenido mucha suerte de poder interactuar con colegas de todo el mundo que han inspirado muchas de las ideas presentadas aquí.

Finalmente dedicamos este libro a nuestras familias, cuyo amor y apoyo ha sido el motor que nos mueve hacia adelante.

Índice

Capítulo 1. La agricultura y los sistemas agrícolas 1
E. FERERES, F.J. VILLALOBOS
1.1. Introducción 3
1.2. Características de los sistemas agrícolas 5
1.3. Gestión de los sistemas agrícolas 6
1.4. Tipos de sistemas agrícolas 8
1.5. La toma de decisiones en la agricultura 10
1.6. Fuentes de información para la toma de decisiones en la agricultura 12
1.6.1. La experiencia del agricultor 12
1.6.2. La investigación, la experimentación y la transferencia de tecnología 13
1.6.3. Información comercial 14
Bibliografía 14

BLOQUE I. EL AMBIENTE DE LOS CULTIVOS

Capítulo 2. El suelo. Propiedades biológicas, físicas y químicas 15
A. DELGADO, J.A. GÓMEZ
2.1. Introducción 17
2.2. Dinámica de la formación del suelo y la pérdida de suelo 18
2.3. Propiedades físicas del suelo: textura y estructura 20
2.4. Propiedades químicas del suelo 21
2.4.1. pH 21
2.4.2. Estado redox 22
2.4.3. Retención de iones en el suelo 23
2.4.4. Salinidad y sodicidad 24
2.5. Propiedades biológicas del suelo 24
2.6. Los ciclos y balances de nutrientes en el suelo 26
Bibliografía 28

Capítulo 3. El balance de radiación 29
F.J. VILLALOBOS, J.P. DE MELO ABREU, L. MATEOS, E. FERERES
3.1. Introducción 31
3.2. La radiación solar 31
3.3. La radiación solar a nivel del suelo 33
3.4. Radiación de onda larga 38
3.5. La radiación neta 39
3.6. Radiación interceptada 40
3.7. Interceptación de radiación de árboles 43
Bibliografía 45

Capítulo 4. El viento y el transporte turbulento 47
FJ VILLALOBOS, E. FERERES, L. TESTI
4.1. El transporte de masa y energía desde el cultivo 49
4.2. El viento y el intercambio de materia, energía y cantidad de movimiento 49
4.3. Perfiles de velocidad del viento por encima del cultivo 50
4.4. Resistencia aerodinámica 52
4.5. La velocidad del viento y la turbulencia a la altura de la cubierta 54
4.6. La velocidad del viento dentro de los cultivos 55
4.7. Variación estacional y diaria de la velocidad y dirección del viento 56
Bibliografía 59

Capítulo 5. La temperatura y la humedad del aire 61
F.J. VILLALOBOS, L. MATEOS, L. TESTI, E. FERERES
5.1. Introducción 63
5.2. Estabilidad térmica 63
5.3. Principios básicos relativos a la humedad del aire 64
5.4. Los perfiles de temperatura dentro y por encima del cultivo 66
5.5. Perfiles de humedad del aire por encima del cultivo 68
5.6. Evolución temporal de la temperatura del aire y la humedad 68
5.7. Flujo de calor sensible 73
5.8. Flujo de calor latente 74
Bibliografía 75

Capítulo 6. La temperatura del suelo y el flujo de calor al suelo 77
F.J. VILLALOBOS, L. TESTI, L. MATEOS, E. FERERES
6.1. Introducción 79
6.2. Propiedades térmicas del suelo 79
6.3. Flujo de calor en el suelo 80
6.4. Variación espacial y temporal de la temperatura del suelo 82
6.5. Efectos de la evaporación y el viento sobre la temperatura del suelo 85
Bibliografía 86

Capítulo 7. El balance de energía 87
F.J. VILLALOBOS, L. TESTI, L. MATEOS, E. FERERES
7.1. Introducción 89
7.2. La ecuación del balance de energía 89
7.3. Importancia relativa de los componentes del balance de energía 91
7.4. Los requerimientos de energía en la agricultura 95
7.5. Salidas de energía de la explotación y eficiencia energética 100
Bibliografía 101

Capítulo 8. El balance de agua 103
F.J. VILLALOBOS, L. MATEOS, F. ORGAZ, E. FERERES
8.1. Introducción 105
8.2. El estado del agua en el suelo: contenido de agua y potencial hídrico 105
8.3. Flujo de agua en el suelo 109
8.4- El balance de agua 109
8.5. Infiltración 110
8.6. Percolación profunda 111
8.7. Escorrentía superficial 114

8.8. Precipitación efectiva 117
8.8.1. Método de la FAO 117
8.8.2. Método del USDA-Soil Conservation Service 118
Bibliografía 118

Capítulo 9. Los componentes de la evapotranspiración 119
F.J. VILLALOBOS, L. TESTI, E. FERERES
9.1. Introducción 121
9.2. Medida de la evapotranspiración 121
9.3. La evaporación desde la superficie del suelo 123
9.4. Análisis de la evapotranspiración con la ecuación de Penman-Monteith 126
9.5. La transpiración 129
9.6. La evaporación desde cultivos mojados 131
Bibliografía 132

Capítulo 10. Cálculo de la evapotranspiración y de las necesidades de agua de los cultivos 133
F.J. VILLALOBOS, L. TESTI, E. FERERES
10.1. Introducción 135
10.2. ET de referencia 135
10.2.1. Método de Hargreaves 136
10.2.2. Método de Penman-Monteith-FAO 137
10.3. Coeficientes de cultivo 137
10.4. Coeficientes de cultivo de especies perennes 142
10.5. Evapotranspiración en invernaderos 143
10.6. Cálculo de la ET máxima para el diseño de sistemas de riego 144
10.7. Cálculo de las necesidades de agua de los cultivos 146
Bibliografía 147
Apéndice 10.1. El tanque de evaporación clase A 148
Apéndice 10.2. Cálculo de los coeficientes de cultivo siguiendo el modelo de Ritchie 149
Apéndice 10.3. Coeficientes de cultivo en la fase C (mid) y en cosecha (end) para diferentes especies cultivadas 150

BLOQUE II. PRODUCTIVIDAD DE LOS CULTIVOS

Capítulo 11. El desarrollo y el crecimiento de los cultivos 155
V.O. SADRAS, F.J. VILLALOBOS, E. FERERES
11.1. Introducción 157
11.2. Desarrollo fenológico 158
11.2.1. Efectos de la temperatura media diaria 160
11.2.2. Vernalización y fotoperiodo 162
11.3. Desarrollo morfológico 164
11.4. Crecimiento 165
Bibliografía 170
Apéndice 11.1. Duración de las fases del ciclo de crecimiento (método de la FAO) para diferentes especies agrícolas y zonas climáticas 170

Capítulo 12. La densidad de plantas y la competencia 177
F.J. VILLALOBOS, V.O. SADRAS, E. FERERES
12.1. Introducción 179

12.2. Densidad y competencia 179
12.3. La variabilidad entre plantas y la jerarquía 180
12.4. Densidad y mortalidad 182
12.5. Mecanismos de competencia entre las plantas 183
12.6. El rendimiento y la densidad de plantas 184
Bibliografía 187

Capítulo 13. Interceptación de radiación, eficiencia en el uso de la radiación y productividad de los cultivos 189
V.O. SADRAS, F.J. VILLALOBOS, E. FERERES
13.1. Introducción 191
13.2. La fotosíntesis a nivel de hoja 191
13.3. Tipos de plantas de acuerdo con los mecanismos de la fotosíntesis 192
13.4. Efectos de los factores ambientales sobre la fotosíntesis 193
13.4.1. Radiación 193
13.4.2. Temperatura 195
13.4.3. La concentración de CO_2 y los factores endógenos 195
13.5. La respiración 196
13.6. La fotosíntesis del cultivo 196
13.7. Radiación interceptada 199
13.8. Eficiencia en el uso de la radiación 200
13.9. Productividad potencial del cultivo 201
13.10. Distribución de materia seca e índice de cosecha 203
13.11. Factores del cultivo que afectan a la interceptación y la eficiencia en el uso de la radiación 205
13.12. Los factores ambientales y de manejo que afectan a la interceptación y a la eficiencia en el uso de la radiación 209
Bibliografía 211

Capítulo 14. Efectos del estrés hídrico en la producción de los cultivos 213
V.O. SADRAS, F.J. VILLALOBOS, F. ORGAZ, E. FERERES
14.1. Introducción 215
14.2. Estado energético del agua en la planta 215
14.3. Las causas del déficit hídrico 216
14.4. Efectos del déficit hídrico 220
14.4.1. Crecimiento expansivo 220
14.4.2. Funcionamiento de los estomas 221
14.4.3. La regulación de la transpiración de los cultivos 223
14.4.4. Efectos sobre otros procesos e interacciones 224
14.5. El acoplamiento de la fotosíntesis y la transpiración 226
14.6. Evaluación del impacto del déficit hídrico en la producción agrícola 228
14.6.1. El modelo de Stewart 228
14.6.2. El modelo de simulación AquaCrop 230
Bibliografía 231

Capítulo 15. Las limitaciones a la productividad de los cultivos 233
V.O. SADRAS, F.J. VILLALOBOS, E. FERERES
15.1. Introducción 235
15.2. Déficit de nutrientes y otras limitaciones de la productividad relacionadas con el suelo 235

15.3. Accidentes climáticos 238
15.3.1. Temperaturas altas 238
15.3.2. El granizo 239
15.4. El encharcamiento 239
15.5. Los factores bióticos 240
15.5.1. Los artrópodos 241
15.5.2. Los patógenos de las plantas 241
15.5.3. Las pérdidas de rendimiento debidas a factores bióticos 242
Bibliografía 243

BLOQUE III. EL MANEJO DEL CULTIVO

Capítulo 16. La siembra y la plantación 245
F.J. VILLALOBOS, F. ORGAZ, E. FERERES
16.1. Introducción 247
16.2. Emergencia del cultivo 247
16.3. Las decisiones relacionadas con la siembra 248
16.4. La fecha de siembra 248
16.5. Cantidad de semilla y densidad de siembra 251
16.6. Profundidad de siembra 253
16.7. Patrón espacial de siembra y método de siembra 253
16.8. Operaciones adicionales 254
16.9. El trasplante de plantas anuales 255
16.10. El trasplante y el injerto de los árboles 255
Bibliografía 256

Capítulo 17. El laboreo 257
J.A. GÓMEZ, F. ORGAZ, H. GÓMEZ-MACPHERSON, F.J. VILLALOBOS, E. FERERES
17.1. Introducción 259
17.2. Objetivos de la laboreo 259
17.2.1. La preparación del lecho de siembra 260
17.2.2. Control de malas hierbas 260
17.2.3. Modificación del balance hídrico 261
17.2.4. Otros objetivos 262
17.3. Influencia de la humedad del suelo en los efectos del laboreo 262
17.4. El laboreo convencional 264
17.5. Compactación y suela de labor 265
17.6. Los requerimientos de energía del laboreo 267
Bibliografía 269

Capítulo 18. La conservación del suelo 271
H. GÓMEZ-MACPHERSON, J.A. GÓMEZ, F. ORGAZ, F.J. VILLALOBOS, E. FERERES
18.1. Introducción 273
18.2. La erosión del suelo 273
18.3. El laboreo de conservación 277
18.4. Sistemas de conservación del suelo en plantaciones frutales y viñedos 283
18.5. El tráfico controlado 284
Bibliografía 286

Capítulo 19. Los sistemas de riego 287
L. MATEOS
19.1. Introducción 289
19.2. Clasificación de los sistemas de riego 289
19.3. Selección de un método de riego 291
19.4. Calidad del funcionamiento de los sistemas de riego 292
19.5. Diseño y manejo de sistemas de riego 295
19.5.1. El riego por superficie 295
19.5.2. Riego por aspersión 297
19.5.3. Riego por goteo y micro-riego 299
19.6. Drenaje 300
19.7. Reutilización del agua 301
Bibliografía 302

Capítulo 20. La programación del riego mediante el balance de agua 303
F.J. VILLALOBOS, L. MATEOS, E. FERERES
20.1. Introducción 305
20.2. La ecuación de balance de agua para la programación del riego 305
20.3. Profundidad radical efectiva 306
20.4. Agotamiento permisible 308
20.5. Criterios para la programación del riego 309
20.5.1. Restricciones a las fechas de riego 310
20.5.2. Restricciones a la dosis de riego 310
20.5.3. Las decisiones sobre las fechas y dosis de riego 310
20.6. Calendarios de riego 314
Bibliografía 315

Capítulo 21. El riego deficitario 317
E. FERERES, F.J. VILLALOBOS
21.1. Introducción 319
21.2. La función de respuesta del rendimiento al agua 319
21.3. El riego deficitario en cultivos anuales 322
21.3.1. Maíz 323
21.3.2. Trigo 323
21.3.3. Arroz 324
21.3.4. Soja 324
21.3.5. Patata 324
21.3.6. Sorgo 324
21.3.7. Tomate 325
21.3.8. Caña de azúcar 325
21.3.9. Algodón 325
21.3.10. Girasol 326
21.4. El riego deficitario de árboles frutales y vides 326
21.4.1. Riego deficitario controlado 327
21.5. El riego deficitario en las explotaciones 329
21.6. Optimización cuantitativa del riego deficitario 329
Bibliografía 332

Capítulo 22. El control de la salinidad 333
F.J. VILLALOBOS, L. MATEOS, M. QUEMADA, A. DELGADO, E. FERERES

22.1. Introducción 335
22.2. Efectos de la salinidad en los cultivos 335
22.2.1. Impactos de la salinidad sobre la productividad del cultivo 336
22.2.2. Toxicidad específica 340
22.3. Los sistemas de riego y la distribución de sales 340
22.4. El balance de sales y la fracción de lavado 343
22.5. Perfiles de salinidad y rendimiento de los cultivos 345
22.6. Necesidad de lavado 347
22.7. Necesidad óptima de lavado 349
22.8. Sodicidad y estructura del suelo 350
22.9. Recuperación de suelos salinos 353
22.10. Recuperación de suelos sódicos 355
Bibliografía 357
Apéndice 22.1. Sensibilidad de diferentes especies cultivadas a la salinidad 357

Capítulo 23. Los fertilizantes 363
A. DELGADO, M. QUEMADA, F.J. VILLALOBOS
23.1. Introducción 365
23.2. Clasificación 367
23.3. Propiedades de los fertilizantes 368
23.3.1. Propiedades físicas 368
23.3.2. Propiedades químicas 369
23.3.3. Concentración de nutrientes en los fertilizantes 370
23.4. Los fertilizantes nitrogenados simples 372
23.4.1. Los fertilizantes con nitrato 372
23.4.2. Los fertilizantes amónicos o amoniacales 372
23.4.3. Los fertilizantes con nitrato y amonio 373
23.4.4. Urea y productos relacionados 373
23.5. Fertilizantes de P simples 374
23.6. Fertilizantes de K simples 375
23.7. Fertilizantes compuestos y complejos 375
23.8. Los fertilizantes y productos con nutrientes secundarios 376
23.9. Los fertilizantes y productos con micronutrientes 377
23.10. Fertilizantes de liberación lenta 379
23.11. Los fertilizantes orgánicos 380
Bibliografía 383

Capítulo 25. La fertilización nitrogenada I: El balance de nitrógeno 385
M. QUEMADA, A. DELGADO, L. MATEOS, F.J. VILLALOBOS
24.1. Introducción 387
24.2. Formas del N en el suelo 388
24.3. Las formas del N absorbidas por las plantas 388
24.4. La fijación simbiótica de N 388
24.5. Cuantificación de la fijación de N 389
24.6. Las transformaciones del N en el suelo 392
24.6.1. La mineralización y la inmovilización 392
24.6.2. La nitrificación 394
24.6.3. La desnitrificación 395
24.6.4. La volatilización de amoniaco 397
24.7. Absorción de N por los cultivos 399

24.8. Lixiviación de nitratos 403
Bibliografía 405
Apéndice 24.1. Concentración de N (% sobre materia seca) en diferentes especies cultivadas 406

Capítulo 25. La fertilización nitrogenada II: Las necesidades de fertilizantes 411
M. QUEMADA, A. DELGADO, L. MATEOS, F.J. VILLALOBOS
25.1. Cálculo de la dosis de fertilizante con N utilizando el método de Nmin 413
25.2. Cálculo de la dosis de fertilizante con N utilizando el balance de N 414
25.2.1. Absorción de N del cultivo (Nc) 414
25.2.2. Contenido de N en el suelo inicial y final y mineralización de N 415
25.2.3. Cálculo de la dosis de fertilizantes de acuerdo con el balance de N. 416
25.3. Métodos para mejorar el manejo del N durante la campaña 420
25.4. La fertilización de árboles frutales 421
25.4.1. Arboles adultos 421
25.4.2. Arboles en crecimiento 422
Bibliografía 423

Capítulo 26. La fertilización con fósforo, potasio y otros nutrientes 425
A. DELGADO, M. QUEMADA, F.J. VILLALOBOS, L. MATEOS
26.1. Introducción: El fósforo y el potasio como nutrientes esenciales 427
26.2. El P en el suelo 429
26.2.1. El P disponible para las plantas en el suelo: el test de P del suelo 431
26.3. El potasio en el suelo 434
26.3.1. El potasio del suelo disponible para la planta 435
26.4. Respuesta de los cultivos a los fertilizantes de P o K 436
26.5. Estrategias de fertilización de fósforo y potasio 438
26.5.1. La estrategia de incremento y mantenimiento 438
26.5.2. La estrategia de suficiencia 442
26.6. Otros nutrientes 443
26.7. El momento de aplicación y el fraccionamiento de los fertilizantes con P o K 444
Bibliografía 446
Apéndice 26.1. Concentración media de P y K (% peso seco) en órganos cosechados y residuos de distintas especies cultivadas 446

Capítulo 27. El fertirriego 451
F.J. VILLALOBOS, M. QUEMADA, A. DELGADO
27.1. Introducción 453
27.2. Sistemas de dosificación 454
27.3. Alternativas de fertirriego 456
27.4. Abonos para el fertirriego 456
27.5. Calidad del agua para fertirriego 459
27.6. Cálculo de las soluciones madre 460
27.7. Control del fertirriego 463
27.8. Cálculo de soluciones nutritivas completas 464
27.9. Ejemplos de programas de fertirriego 468
Bibliografía 470

Capítulo 28. La manipulación del ambiente de los cultivos 471
F.J. VILLALOBOS, L. TESTI, L. MATEOS
28.1. Introducción 473
28.2. Efectos del viento sobre los cultivos 473
28.3. Los cortavientos 474
28.4. El viento y la turbulencia en la zona protegida 475
28.5. Establecimiento y mantenimiento de los cortavientos 476
28.6. Cambios del microclima en el área protegida 477
28.7. Cortavientos dispersos 478
28.8. La importancia de la temperatura del suelo, del aire y del cultivo 479
28.9. Pendiente y orientación 479
28.10. Acolchados 480
28.11. Calentamiento artificial del suelo 482
28.12. Modificación de la temperatura de la cubierta 483
28.13. Temperatura mínima del cultivo 485
28.14. Cálculo de la temperatura máxima del cultivo 485
28.15. Los invernaderos 488
Bibliografía 490

Capítulo 29. Protección contra las heladas 491
J.P. DE MELO-ABREU, F.J. VILLALOBOS, L. MATEOS
29.1. Introducción 493
29.2. Efectos de las heladas sobre la producción de los cultivos 493
29.3. Tipos de helada 497
29.4. Climatología de las heladas 499
29.5. Riesgo de temperaturas extremadamente frías 501
29.6. Un modelo simple del enfriamiento nocturno de la superficie 502
29.7. Protección contra las heladas 503
29.7.1. Métodos pasivos 503
29.7.2. Métodos activos 505
Bibliografía 507

Capítulo 30. El control de las malas hierbas y otros factores bióticos 509
F.J. VILLALOBOS, L. MATEOS, E. FERERES
30.1. Introducción 511
30.2. Características de las malas hierbas 511
30.2.1. La dispersión de las malas hierbas 511
30.2.2. Persistencia de las malas hierbas 512
30.3. Clasificación de las malas hierbas 514
30.4. Interacciones entre el cultivo y las malas hierbas 514
30.5. Umbral económico 515
30.6. Control de enemigos bióticos 517
30.6.1. El control mecánico 518
30.6.2. Otras técnicas de control 519
30.7. Uso de cultivares con resistencia a plagas y enfermedades 520
30.8. Manejo de malas hierbas 521
Bibliografía 521

Capítulo 31. La aplicación de herbicidas y otros plaguicidas 523
F.J. VILLALOBOS, E. FERERES

31.1. Introducción 525
31.2. Los plaguicidas 525
31.3. Aplicación de plaguicidas 526
31.4. Deriva 529
31.5. Persistencia de los plaguicidas 530
31.6. Los herbicidas 531
31.6.1. Características generales 531
31.6.2. La selectividad de los herbicidas 531
31.7. Los insecticidas 533
31.8. Los fungicidas y el control de las enfermedades 534
31.9. Cálculo de la dosis de plaguicidas 536
31.10. Cálculo de la dosis de pulverización para árboles frutales 537
Bibliografía 538

Capítulo 32. Recolección y conservación 539
F.J. VILLALOBOS, E. FERERES
32.1. Introducción 541
32.2. Operaciones de recolección 542
32.3. Las pérdidas de rendimiento durante la recolección 543
32.4. Operaciones agrícolas afectadas por la recolección 545
32.5. Recolección de granos y semillas 545
32.6. Recolección de cultivos forrajeros 549
32.7. Recolección de órganos subterráneos 550
32.8. Recolección de frutas y hortalizas 551
Bibliografía 551
Apéndice 32.1. Fracción de materia seca (MS), energía bruta por unidad de peso seco (EB) y composición principal de los productos cosechados 552

Capítulo 33. Nuevas herramientas y métodos en la agronomía 557
P.J. ZARCO-TEJADA, L. MATEOS, E. FERERES, F.J. VILLALOBOS
33.1. Introducción 559
33.2. La teledetección 559
33.2.1. Definición de teledetección 559
33.2.2. Teledetección activa y pasiva 559
33.2.3. El espectro electromagnético y las bandas espectrales 559
33.2.4. El concepto de multiespectral 560
33.2.5. La reflectancia y las firmas espectrales 561
33.2.6. La resolución en teledetección 562
33.3. Los sensores y las plataformas de teledetección 563
33.4. El manejo de riego con ajuste local 565
33.4.1. El manejo del cultivo con ajuste local 565
33.4.2. Las oportunidades proporcionadas por el riego con ajuste local 566
33.4.3. Definición de las zonas de manejo 567
33.5. Posicionamiento y automatización 568
33.6. Modelos de simulación de cultivos, sistemas expertos y tecnologías de la información 568
Bibliografía 570

Capítulo 34. Sistemas de cultivo y sistemas de producción 571
H. GÓMEZ MACPHERSON, F.J. VILLALOBOS, E. FERERES

34.1. Introducción 573
34.2. Tipos de sistemas de cultivo 573
34.3. Cultivos asociados 574
34.4. Los sistemas agroforestales 577
34.5. La rotación de cultivos 578
34.6. El diseño de la rotación de cultivos 580
34.7. Sistemas de producción agropecuarios 581
Bibliografía 583

Capítulo 35. La agronomía y la sostenibilidad de la producción agrícola 585
E. FERERES, F.J. VILLALOBOS
35.1. Introducción 587
35.2. El clima, el suelo y el agua 590
35.2.1. El cambio climático 590
35.2.2. La degradación de los suelos 592
35.2.3. La escasez de agua 593
35.3. El papel de la Mejora Vegetal 594
35.4. Sistemas agrícolas alternativos: la agricultura ecológica 596
35.5. La agricultura como fuente de energía 597
35.6. El papel de las tecnologías de la información/comunicación, la investigación y la extensión 599
35.7. Seguridad alimentaria y salubridad de los alimentos 601
Bibliografía 603

Prólogo

Este libro de texto es el resultado de una larga experiencia en la enseñanza de agronomía general en la Universidad de Córdoba (España). Después de muchos años de enseñanza de la asignatura a los estudiantes de ingeniería agronómica en español, ahora ofrecemos una clase separada en Inglés, y este libro refleja la organización y los materiales utilizados en esa clase.

El libro refleja nuestra visión de la agronomía como una materia compleja e integradora, en el cruce de muchas disciplinas (Ecología de cultivos, Agrometeorología, Edafología, Ingeniería Agrícola) con un fuerte énfasis en proporcionar respuestas cuantitativas a problemas específicos. Nuestra experiencia se ha relacionado principalmente con la agricultura en situaciones de deficiencia de agua, y por lo tanto, hay un énfasis en todo el libro sobre el papel del agua en la agronomía de los sistemas agrícolas. También tratamos de dejar atrás las fronteras artificiales que se han creado en el pasado entre las áreas de producción de cultivos como la Horticultura, la Pomología o la Agronomía de cultivos extensivos, que han conducido a distintas revistas científicas y carreras profesionales en el pasado. En este libro cubrimos todos los aspectos comunes de manejo de los cultivos y la productividad que pueden interesar a cualquiera que se relacione con el manejo de los sistemas agrícolas y proporcionamos ejemplos relevantes de diferentes sistemas de cultivo, desde herbáceos hasta cultivos leñosos.

Nuestro enfoque cuantitativo se basa en proporcionar las ideas y conceptos necesarios como fundamento para todas las evaluaciones cuantitativas requeridas para la toma de decisiones técnicas informadas en el manejo de las explotaciones. Los agricultores operan según la filosofía de aprender haciendo (manejo adaptativo) y los agrónomos también deben seguir el mismo camino, pero deben tener el conocimiento y las herramientas que se necesitan para primero interpretar correctamente las complejas respuestas del sistema a los cambios, y después ofrecer opciones razonables para las acciones posteriores. Este libro no entra en la categoría de los que proporcionan recomendaciones agronómicas prescriptivas o planes de acción que no se pueden generalizar a causa de su naturaleza empírica. Por el contrario, hemos tratado de concentrarnos en el análisis de los procesos de la productividad de los cultivos, lo que lleva a identificar los factores principales que afectan a las decisiones de manejo, y nos centramos también en cómo obtener respuestas cuantitativas a los problemas agronómicos en el contexto de hacer que los sistemas agrícolas actuales sean más sostenible.

Desde una perspectiva de la enseñanza el libro incluye dos bloques cortos sobre la productividad de los cultivos y el medio ambiente que podría servir como una introducción para los estudiantes que no han cursado previamente Edafología, Ecología de cultivos o Agrometeorología. El tercer bloque, que es el más extenso, está dedicado a las técnicas específicas de producción de cultivos (siembra, manejo de suelos, riego, fertilizantes, etc.). Un grupo de colegas nuestros han contribuido a la redacción de capítulos específicos, todo ello con el objetivo de proporcionar a los futuros agrónomos y agricultores las herramientas cuantitativas necesarias para calcular el nivel adecuado de insumos (agua, nutrientes o energía) para la producción sostenible de los cultivos, y para evaluar las respuestas del rendimiento como una función de las condiciones climáticas y del suelo, y de las opciones de manejo.

Capítulo 1

La agricultura y los sistemas agrícolas

E. FERERES
F.J. VILLALOBOS

RESUMEN:

La Ecología de Cultivos trata de los ecosistemas agrícolas que el hombre manipula para canalizar los flujos de energía hacia productos que le son útiles (alimentos y materias primas). Los ecosistemas agrícolas muestran normalmente baja biodiversidad, baja autonomía y una cadena trófica corta. Las principales características de los sistemas de cultivo son la productividad, la estabilidad, la resiliencia y la sostenibilidad, reflejando esta última la capacidad de mantener un cierto nivel de producción de forma indefinida. La producción de los sistemas agrícolas requiere aportaciones de materia, energía e información. Normalmente, el óptimo económico de suministro de insumos está por debajo del requerido para lograr la máxima producción. Se definen diversos parámetros para caracterizar la productividad de los sistemas agrícolas (el rendimiento potencial, el rendimiento alcanzable y el rendimiento real).

La actividad agrícola se lleva a cabo bajo incertidumbre debido a numerosos factores ambientales y económicos. Ante la incertidumbre, las decisiones de los agricultores se centran en evitar el riesgo y pueden conducir a la pérdida de oportunidades. Para tomar decisiones racionales el agricultor tiene acceso a muchas fuentes de información, desde su propia experiencia hasta la investigación y transferencia de tecnología. La tendencia actual es mejorar el acceso y el uso de información relevante sobre el sistema agrícola para apoyar la toma de decisiones.

1.1. INTRODUCCIÓN

Según estadísticas recientes de la FAO, la agricultura ocupa el 28% de la superficie terrestre del planeta, con un 30% dedicado a los cultivos y el 70% a pastos. En términos aproximados, la superficie cultivada es inferior al 10% de la superficie, abarcando alrededor de 1500 millones de ha, cifra que apenas ha cambiado desde 1960, ya que la expansión de nuevas tierras de cultivo ha sido compensado por la desaparición de suelo cultivable, debido sobre todo a la urbanización y a la degradación irreversible del suelo. De esta superficie, el 90% se dedica a cultivos anuales y el 10% a cultivos perennes. Las tierras de regadío ocupan más de 300 millones de hectáreas, que representan el 17% de la superficie cultivada. Los cereales son los cultivos dominantes que representan casi el 60% de la superficie total cultivada. De hecho, aunque se usan más de 7000 especies de plantas en la agricultura, sólo se consideran importantes alrededor de 120, y más del 90% de las calorías consumidas hoy por los seres humanos provienen de menos de 30 especies. Esto no quiere decir que la biodiversidad agrícola es baja, debido a que hay colecciones de germoplasma que albergan muchos miles de genotipos para cada una de las principales especies cultivadas.

La agricultura permite al hombre producir alimentos y otros productos mediante la gestión y manipulación de las redes tróficas de los ecosistemas (Recuadro 1.1). La agricultura es un conjunto de intervenciones humanas que alteran los ecosistemas para maximizar el rendimiento del producto deseado y minimizar las pérdidas de energía a lo largo de las cadenas tróficas. La ciencia y la tecnología de la producción y el uso de plantas para uso humano es la Agronomía. Se trata de la explotación por el hombre de los ecosistemas terrestres y tiene, por lo tanto, sus raíces en la Ecología. Los ecosistemas modificados por la agricultura se denominan agroecosistemas y la ciencia que se ocupa de su estudio es la Ecología de Cultivos. Un agroecosistema es un ecosistema gestionado por el hombre con el objetivo final de producir alimentos y otros bienes y servicios derivados de la agricultura. La presión demográfica ha reducido el área de los ecosistemas libres de la intervención humana. Sin embargo, hay reservas, bosques y otras áreas que pueden ser llamados ecosistemas naturales, que en general se caracterizan por el aumento de la biodiversidad, cadenas tróficas más largas y mayor autonomía que los agroecosistemas.

El agroecosistema se caracteriza por la presencia de un menor número de especies que el ecosistema natural. Esta diversidad más baja es el resultado de la necesidad de reducir las pérdidas de energía a lo largo de las cadenas tróficas en ecosistemas agrícolas, cuyo objetivo es eliminar todas las transferencias de energía no deseadas (a parásitos, patógenos o plantas que compiten con el cultivo) y por lo general se asocia con un acortamiento de la cadena trófica. La autonomía energética de los agroecosistemas es relativamente baja ya que dependen de insumos de materiales, energía e información proporcionada por los seres humanos.

La unidad de estudio en Ecología de Cultivos es el campo o parcela. Una comunidad de plantas, junto con las prácticas de manejo (por ejemplo, método de laboreo, rotación, etc.) que se encuentran en un campo se llama sistema de cultivo.

En este nivel se pueden analizar los procesos de producción de plantas, sus relaciones con el suelo y su dependencia del medio aéreo. Mediante la observación de la misma parcela durante varios años podemos analizar los efectos de la rotación, las prácticas de laboreo o la gestión de los residuos de cultivos en las propiedades del suelo y los rendimientos resultantes, ya que se ven afectados por el uso de recursos como el agua y los nutrientes. Los análisis económicos o la determinación de necesidades de mano de obra se hacen a menudo a escala de parcela. Una explotación representa una única unidad de gestión constituida por un número de campos o parcelas.

A un nivel más alto de organización, el sistema de cultivo es parte de un sistema de explotación donde otros elementos (por ejemplo, ganado) también son manejados por el agricultor para producir insumos para los cultivos (p.ej. estiércol) o para consumir productos vegetales (p.ej. forrajes). Los diferentes cultivos y prácticas de manejo que prevalecen en una zona determinada, se denominan sistemas agrícolas a escala regional.

La agricultura, al igual que todas las actividades humanas, ha conocido éxitos y fracasos a lo largo de su historia. Hoy en día la agricultura produce alimentos suficientes para la gran mayoría de la población mundial, a pesar del crecimiento sin precedentes de la población experimentado en los últimos 50 años. Sin embargo, la agricultura tiene también impactos ambientales negativos, como la degradación del suelo y la contaminación del agua por el uso de fertilizantes y pesticidas, el uso excesivo de los recursos hídricos, y la reducción de la biodiversidad. Por otra parte, otros sectores de la sociedad son muy sensibles a los problemas creados por la agricultura, en particular los relacionados con la seguridad alimentaria y las amenazas a los ecosistemas naturales.

Recuadro 1.1. Ecología y ecosistemas

La ecología es la ciencia que estudia las relaciones entre los organismos y su ambiente. El ambiente es el conjunto de factores bióticos y abióticos que afectan el crecimiento, la reproducción o la mortalidad de los organismos. Los factores ambientales pueden dividirse en recursos cuando el factor se consume directamente por el organismo (p.ej. un nutriente) o reguladores, cuando afectan a la velocidad de uso de los recursos (por ejemplo, temperatura).

Un ecosistema es un grupo de organismos y el ambiente, que coinciden en el tiempo y el espacio. El ecosistema es la unidad fundamental de estudio de la ecología. Los organismos en un ecosistema están relacionados entre sí por los flujos de energía y materiales. La caracterización dimensional de los flujos de energía en el ecosistema se denomina cadena trófica. La fuente primaria de energía es la radiación solar, la fuerza motriz de la vida en la Tierra. Los productores primarios fijan la energía solar a través de la fotosíntesis, transformándola en energía utilizable que se transferirá a lo largo de las cadenas tróficas. Durante millones de años, el hombre ha obtenido la energía necesaria para la vida de diferentes cadenas tróficas, por la caza y la recolección de plantas comestibles hasta hace 10 000 años, cuando se inventó la agricultura.

1.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS AGRÍCOLAS

El objetivo primario de la agricultura es la producción de suficientes alimentos y otros bienes y servicios, de manera que la explotación se mantenga viable. Por lo tanto, una característica clave de los sistemas de cultivo es su productividad, definida como la producción por unidad de recurso utilizado, que normalmente es la superficie cultivada, principal factor limitante de la agricultura. Por lo tanto, la productividad se define como el rendimiento de producto utilizable por unidad de superficie, pero se puede aplicar a otros insumos naturales o artificiales como la radiación, el agua, los nutrientes o la mano de obra, que también se mide típicamente por unidad de superficie. El nivel de productividad sirve además como una medida indirecta de la eficiencia con la que se utilizan los insumos.

En la caracterización de los sistemas agrícolas, el término eficiencia se emplea a menudo para definir los coeficientes de productividad de los cultivos y de ciertos insumos. Por ejemplo, la eficiencia del uso del agua se define como la relación del rendimiento con el volumen de agua utilizada, aunque sería más correcto hablar de la productividad del agua o de los nutrientes, expresados como kg/m^3 de agua o kg/kg de nutrientes. En ingeniería, la eficiencia es la relación entre la salida y la entrada de cualquier entidad de un sistema, por ejemplo, la energía suministrada a un motor.

Además de la productividad y la eficiencia hay otras propiedades importantes de los sistemas agrícolas. Los rendimientos pueden variar de un año a otro por el clima y otras causas. La estabilidad a largo plazo se refiere a la magnitud de estas oscilaciones. La falta de estabilidad provoca fluctuaciones en la producción que amenazan la persistencia de los sistemas agrícolas. Esto es particularmente cierto cuando hay secuencias de años sucesivos con bajo rendimiento que pueden tener un efecto catastrófico sobre su viabilidad económica. En cuanto a las fluctuaciones de la productividad, hay otra característica denominada resiliencia que se define como la capacidad del sistema de recuperarse de un acontecimiento catastrófico, como por ejemplo una sequía. Se trata de una propiedad deseable de los agroecosistemas.

Otra característica de los sistemas agrícolas es su sostenibilidad que indica la capacidad de mantener un cierto nivel de producción de forma indefinida. Esta característica se deriva del concepto de desarrollo sostenible, un modelo de desarrollo que propone el crecimiento económico sin afectar adversamente las oportunidades de las generaciones futuras. Un sistema de producción se considera sostenible cuando es económicamente viable y socialmente aceptable. Sin embargo, hay que definir el marco temporal ya que lo que hoy es factible y aceptable puede no serlo en el futuro. Así, en los sistemas agrícolas sería más correcto hablar del grado de sostenibilidad: un sistema será más sostenible cuando su explotación no degrade la calidad de los recursos hídricos y edáficos, y cuando las prácticas de gestión actuales no afecten a la productividad y la viabilidad del sistema en el futuro. La mejora de la sostenibilidad debe basarse en dos objetivos: reducir o eliminar, en lo posible, los efectos ambientales negativos de la agricultu-

ra, mientras que se mantiene una alta productividad. Como consecuencia de décadas de producción intensiva en muchos sistemas agrícolas se han causado efectos ambientales negativos y se ha creado una conciencia de la necesidad de centrarse en la sostenibilidad de los sistemas agrícolas, dando lugar a un debate sobre el desarrollo de nuevas formas de agricultura que garanticen la sostenibilidad económica y ecológica.

1.3. GESTIÓN DE LOS SISTEMAS AGRÍCOLAS

La estrategia de la agricultura es manipular el medio ambiente y la comunidad de plantas para optimizar el rendimiento de los productos útiles para el hombre. Esto implica el establecimiento de comunidades (cultivos o pastos) dominados por especies que acumulan una gran proporción de la producción primaria en órganos o materiales utilizables. Además, el agricultor trata de minimizar las pérdidas del sistema debidas a insectos, enfermedades y malas hierbas.

Los agricultores tienen numerosas herramientas de manejo para controlar sus cultivos, como el laboreo para la eliminación de malas hierbas y la preparación del lecho de siembra, la elección de especies y cultivares, la fecha de siembra y la densidad de siembra, la aplicación de fertilizantes y pesticidas, etc. Algunos factores externos como el clima y los mercados son difíciles de predecir por lo que la flexibilidad en el manejo del cultivo es muy importante para reducir al mínimo el riesgo de pérdida de cosechas o las pérdidas económicas en la explotación. Por ejemplo, una aplicación de fertilizante puede reducirse o no aplicarse si la precipitación es muy baja o si el precio esperado del producto es muy bajo.

En general, para muchos insumos la curva de respuesta del rendimiento al nivel de insumo es curvilínea y el máximo beneficio se alcanza con un nivel de insumos por debajo (ligeramente) del requerido para obtener el máximo rendimiento. Esto se debe a las sinergias que se producen entre los distintos insumos y a la existencia de costes fijos, que hacen que las estrategias de bajos insumos sean generalmente poco eficientes. Las explotaciones más productivas y más rentables son los que utilizan los niveles de recursos en proporción al rendimiento objetivo, sin que ningún recurso limite claramente el rendimiento. Por ejemplo, no tiene mucho sentido proporcionar agua adicional mediante riego si no se proporcionan las cantidades adicionales de fertilizantes requeridos para alcanzar el rendimiento objetivo.

Ejemplo 1.1.

La respuesta de un cultivo de trigo al fertilizante nitrogenado en una zona mediterránea de secano se muestra en la Tabla 1.1. En este caso el mayor rendimiento se consigue utilizando 250 kg N por hectárea. Sin embargo, el óptimo económico se consigue con una aplicación de 200 kg N/ha. También podemos ver que un uso muy limitado de los recursos conduce a un peor rendimiento económico que el uso excesivo.

Tabla 1.1. Análisis de la respuesta de un cultivo de cereales al fertilizante nitrogenado aplicado. El precio de venta es 0.25 €/kg, el coste del fertilizante es 0.80 €/kg y el coste fijo es 200 €/ha.

N aplicado	Rendimiento	Ingresos	Coste N	Ingresos –coste N	Beneficio neto
kg de N / ha	kg / ha	€ / ha			
0	1200	300	0	300	100
50	1929	482	40	442	242
100	2329	582	80	502	302
150	2558	640	120	520	320
200	2883	721	160	561	361
250	3020	755	200	555	355

Los criterios para la gestión de sistemas agrícolas deben tener en cuenta muchos factores que se ven afectados por las decisiones de los agricultores. No sólo los procesos de producción de plantas y animales son importantes, sino que también lo son los objetivos económicos, además de los efectos sobre los suelos, el agua, el bienestar animal y la salud humana, la biodiversidad y el paisaje. Todos estos aspectos tienen un peso diferente en función del sistema de cultivo en cuestión, aunque, como en cualquier otro negocio, cuando la explotación no se dedica a la subsistencia del propietario, se maneja en base a criterios económicos. Sin embargo, hay muchas facetas de la gestión de los sistemas agrícolas. En las zonas donde el ratio población/superficie cultivable y los precios de los insumos son bajos (por ejemplo, EE.UU. y Australia), el énfasis está en la maximización del beneficio por unidad de mano de obra. En el norte y centro de Europa y en Japón, donde la tierra cultivable es escasa y los precios de insumos y salarios son altos, los agricultores tienden a maximizar la productividad por unidad de superficie. Objetivos similares se persiguen en la agricultura de China y la India debido a la limitada disponibilidad de tierra cultivable. Estas situaciones contrastan con los de muchos países pobres, donde la mano de obra es abundante y el acceso a los insumos y capital escaso.

El rendimiento de los cultivos están cerca de su máximo potencial sólo en algunas áreas (como en explotaciones de Japón y el norte de Europa), por lo que los rendimientos medios de los sistemas agrícolas son generalmente pobres indicadores de su productividad potencial. Los rendimientos reales se encuentran en un intervalo amplio desde cero hasta un nivel máximo alcanzable que sólo está limitado por el ambiente aéreo (radiación solar y régimen de temperatura). Este nivel de rendimiento se denomina rendimiento potencial. El rendimiento real se define como el rendimiento medio de un cultivar en todos los campos de una explotación o de una región específica, y representa el estado del clima y del suelo y la capacidad de los agricultores para aplicar con éxito la tecnología disponible.

El rendimiento potencial de una especie en un área se consigue cuando la tecnología no es limitante, es decir, cuando todas las entradas se utilizan de manera óptima. En sentido estricto, este concepto se aplica a la producción de un cultivar sin limitaciones debidas al agua o los nutrientes y con control total de malas hierbas, plagas y enfermedades. En general, el rendimiento potencial se calcula usando modelos teóricos basados en el clima y otros factores ambientales y en las características morfológicas y fisiológicas del cultivo en cuestión. En la práctica, estas estimaciones de rendimiento potencial deben ser contrastadas con los rendimientos récord obtenidos por los mejores productores en la misma zona geográfica.

Hay una diferencia considerable entre el rendimiento real y el potencial en la mayoría de los sistemas agrícolas, así que a veces se definen otros índices para fines de diagnóstico. Por ejemplo, el rendimiento alcanzable se define como el rendimiento que se obtiene dentro de las limitaciones ambientales de clima y suelo de la zona, utilizando la mejor tecnología disponible hoy. Los rendimientos obtenidos por los mejores agricultores y las estaciones de investigación en el área son indicadores del rendimiento alcanzable. El rendimiento alcanzable en años particularmente favorables será el rendimiento récord.

Los conceptos de rendimiento potencial y real (y hasta cierto punto los rendimientos alcanzables y récord) son muy útiles para la evaluación de los sistemas agrícolas y la identificación de posibles mejoras que ayudarán a cerrar la brecha entre ellos. Estos conceptos también se utilizan para definir la intensidad de cultivo. En la agricultura intensiva de Japón y el norte de Europa, los rendimientos reales se encuentran cerca de los rendimientos potenciales y la brecha es pequeña. A medida que los rendimientos reales se acercan a los potenciales, hay poco incentivo para que los agricultores intensifiquen aún más la producción y siempre va a haber alguna diferencia entre la producción real y potencial. Conforme aumenta la diferencia entre rendimientos reales y potenciales, también lo hacen las oportunidades para aumentar la productividad.

1.4. TIPOS DE SISTEMAS AGRÍCOLAS

Los sistemas agrícolas se pueden clasificar según diferentes criterios. Un enfoque con base ecológica se basa en el tipo de cadena trófica. La cadena más corta es una en la que los cultivos son consumidos directamente por los seres humanos. En otras cadenas, cultivos o pastos son consumidas por el ganado, que a su vez se consume por los seres humanos. La eficiencia energética de un sistema es menor cuanto mayor es el número de niveles de la cadena trófica. En promedio cada transferencia en una cadena alimentaria tiene una eficiencia neta de aproximadamente 10%. Por lo tanto, para una productividad primaria neta de 100 unidades, si se consume directamente (dieta vegetariana), la transferencia de energía es cerca de 100. Si se emplea ganado para transferir la energía a los seres humanos sólo 10 serían recuperados. Esto no implica que la cría de animales deba ser abandonada. Por un lado, los animales son la única opción para la explotación de las zonas marginales, donde la producción de cultivos no es posible (véase más adelante). Por otro lado, algunos

animales pueden utilizar materiales no digeribles por los humanos (por ejemplo, celulosa en residuos de cosecha) o no adecuados para la alimentación (por ejemplo, restos de comida, residuos de procesos industriales).

La agricultura tiene como objetivo minimizar los flujos de energía a través de rutas no deseadas (malas hierbas, insectos, etc.) que terminan en el nivel de los descomponedores. Como hemos visto, una cadena trófica corta (cultivos ---> humanos) es la más eficiente desde el punto de vista de transferencia de energía. Sin embargo, en muchos sistemas agrícolas las condiciones ambientales (por ejemplo, suelos pobres/poco profundos) impiden la obtención de productos para uso directo por los seres humanos (por ejemplo, la producción de cereales) y sólo pueden producirse pastos. También es el caso de las zonas con encharcamiento semipermanente o de las zonas muy áridas. En todas estas situaciones, el ganado permite la conversión de la producción primaria a otras formas utilizables por el hombre, aún a costa de una menor eficiencia.

Los sistemas agrícolas se pueden caracterizar también de acuerdo con su posición dentro de un intervalo que va desde la agricultura de subsistencia a la agricultura intensiva. En la agricultura de subsistencia, se utilizan muchas especies, las variedades están adaptadas a las condiciones locales, el potencial productivo es bajo y los rendimientos reales son bajos, pero estables. En estos sistemas se emplea mucha mano de obra y la ganadería es un componente esencial para el manejo de nutrientes, por lo que se alcanza una alta eficiencia energética. En el extremo opuesto, la agricultura intensiva se caracteriza por su menor diversidad genética (tanto en especies como en cultivares) para alcanzar altos rendimientos. Además se emplea mucha maquinaria para reemplazar la mano de obra, y se emplean fertilizantes y pesticidas, lo que resulta en una alta productividad, aunque a menudo con baja eficiencia.

Históricamente la agricultura en los países desarrollados ha experimentado una transición de la agricultura de subsistencia a la agricultura intensiva con un aumento continuo de la productividad y una disminución gradual de la eficiencia energética. Las rutas han sido diferentes dependiendo de cómo ha evolucionado la utilización de la tierra en los diferentes países: por ejemplo, Canadá, Australia y gran parte de los EE.UU. y Argentina, no han intensificado su agricultura tanto como ha ocurrido en el norte y centro de Europa y en Japón. En muchos países asiáticos se practica una agricultura muy intensiva con alto uso de ciertos insumos y bajas brechas de rendimiento. Por lo tanto, en algunos países desarrollados podemos encontrar sistemas extensivos con bajos insumos pero alto nivel de mecanización, que requieren grandes superficies para que las explotaciones sean económicamente viables, mientras que en otros países (en su mayoría en desarrollo) los sistemas altamente productivos con alto uso de mano de obra pueden coexistir con los sistemas agrícolas de subsistencia.

La intensificación de la agricultura en muchos países ha dado lugar a importantes episodios de contaminación debido a los excesos en el uso de insumos como fertilizantes y pesticidas y, en algunos casos, a la producción de excedentes agrícolas debido a los subsidios agrícolas mal concebidos. En algunos casos, los incidentes de

seguridad alimentaria han sido relacionados por la opinión pública de estos países con la intensificación de la agricultura. Esto ha llevado a propuestas para desarrollar sistemas agrícolas alternativos, algunos basados en evitar el uso de fertilizantes minerales y pesticidas sintéticos, tales como las diferentes formas de agricultura biológica o ecológica, llamada agricultura orgánica. Otras alternativas han propuesto la adopción de prácticas agrícolas que respeten el medio ambiente y que garanticen la calidad y la seguridad de los alimentos. El término "agricultura sostenible" se refiere a las prácticas agrícolas que permitan el mantenimiento indefinido (sostenibilidad) de los sistemas agrícolas, lo que requiere la conservación de los recursos y el mantenimiento de explotaciones económicamente viables. Algunos autores hablan de una transición de la agricultura tradicional (bajos insumos, bajo control) a la agricultura intensiva (altos insumos, bajo control), de la que hay que pasar a una agricultura más sostenible (insumos optimizados, alto control), donde los recursos son utilizados sólo en las cantidades apropiadas para cada sistema y donde hay un mejor control del ambiente y el cultivo.

1.5. LA TOMA DE DECISIONES EN LA AGRICULTURA

Los agricultores deben combinar una serie de factores biológicos, físicos y económicos al tomar sus decisiones. El éxito de la actividad de un agricultor puede medirse por varias variables (por ejemplo, los ingresos netos, el rendimiento, etc.), pero no sólo importa el valor medio de la variable, sino también su distribución estadística y los valores extremos. La actividad agrícola se caracteriza por la incertidumbre de un sistema que depende del tiempo atmosférico, que es muy variable y de diversos factores bióticos relativamente impredecibles (plagas y enfermedades). Por lo tanto, las mismas prácticas agrícolas pueden dar lugar a diferentes rendimientos en diferentes años. Se puede decir entonces que un conjunto de prácticas agrícolas dará lugar a una distribución de frecuencia de la variable considerada (por ejemplo, rendimiento). El conocimiento de la distribución es necesario para que el agricultor pueda tomar decisiones de manera racional. Por ejemplo, un conjunto de prácticas agrícolas puede resultar en un alto rendimiento medio, pero con rendimientos muy bajos en ciertos años, lo que tendría efectos catastróficos sobre la viabilidad económica de la explotación. Un agricultor puede elegir obtener un rendimiento promedio menor a cambio de evitar esos años de rendimiento muy bajo.

Ejemplo 1.1.

El resultado de dos estrategias de fertilización nitrogenada diferentes (A = sin fertilizante, B = 50 kg N/ha) durante 30 años en un cultivo de cereales se muestra en la Fig. 1.1. El rendimiento promedio es mayor para la estrategia B, pero la estrategia A tiene una desviación estándar más baja (217 vs 583 kg ha $^{-1}$). La estrategia B (aplicar fertilizante) implica un mayor riesgo (menores rendimientos en los peores años). Si el agricultor no puede soportar un solo año de bajo rendimiento, preferirá la estrategia A, aunque implica un rendimiento medio más bajo.

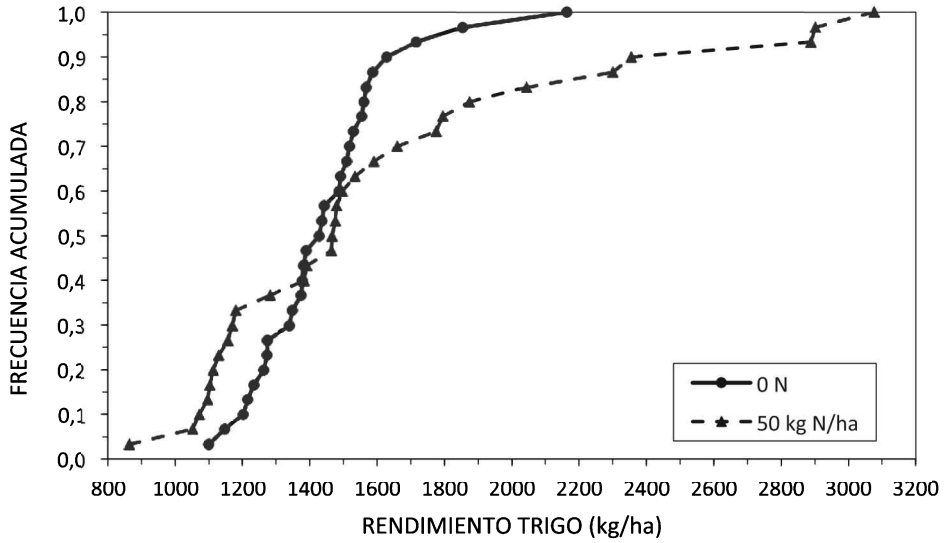


Figura 1.1. Distribución acumulada de frecuencias del rendimiento de trigo con cero fertilizante o 50 kg de N/ha en una zona muy seca. La media y las desviaciones estándar son 1447 y 217 kg/ha para cero N y 1606 y 583 kg/ha para 50 kg N/ha, respectivamente.

La incertidumbre de la agricultura no es sólo el resultado de la variabilidad del clima y la posible presencia de plagas o enfermedades. Los precios de los productos e insumos agrícolas pueden diferir sustancialmente de los precios esperados para el agricultor, lo que dificulta aún más la toma de decisiones. La incertidumbre de los mercados es proverbial, y más recientemente, la volatilidad de los precios de los cereales ha causado crisis alimentarias en varios países. Las grandes fluctuaciones de precios tienen una influencia muy negativa en la sostenibilidad de la agricultura, sobre todo en el caso de las frutas y hortalizas, donde hay muchos intermediarios entre el productor y el consumidor.

La tendencia histórica general en los sistemas agrícolas de todo el mundo ha sido el desarrollo de prácticas de manejo que reducen el riesgo, es decir, para asegurar suficientes rendimientos en años adversos. Con ello no se aprovecha plenamente el potencial en los años más favorables, e incluso se puede reducir el rendimiento en años promedios, lo que resulta en no alcanzar el máximo rendimiento medio. En el pasado, cuando los agricultores no tenían acceso a seguros o subsidios, una secuencia de varios años de malas cosechas ponía en serio peligro la existencia misma de la explotación y la del propio agricultor. Esto ha conducido a que evitar el riesgo sea una prioridad en las decisiones estratégicas de la agricultura en muchas áreas, particularmente en sistemas de secano. Ejemplos de ello serían la adopción de una baja densidad de plantación en el olivar de secano de modo que el árbol siempre tiene suficiente agua disponible, incluso en los peores años de sequía, o el uso de barbecho de año y vez en las rotaciones de cereales para almacenar el agua de llu-

via en el suelo durante el año de descanso para la próxima cosecha. Esta tendencia a evitar el riesgo explica en parte la lenta adopción de nuevas tecnologías en muchos sistemas agrícolas, en comparación con otros sectores productivos.

Las decisiones sobre una explotación se pueden clasificar en cuatro tipos (operativos, tácticos, estratégicos y estructurales) que corresponden a diferentes niveles temporales. Las decisiones operativas se realizan durante el ciclo del cultivo (por ejemplo, fechas de riego, cantidades de fertilizantes, la fecha de aplicación de un insecticida). Las decisiones tácticas se hacen sólo una vez por campaña (la elección de cultivos y la fecha de siembra, el rendimiento objetivo, etc.). Las decisiones estratégicas y estructurales tienen un impacto en una serie de campañas (por ejemplo, la orientación productiva de la explotación, la inversión en maquinaria, las mejoras en la infraestructura). Obviamente, si nos ocupamos de cultivos plurianuales (por ejemplo, plantaciones), la clasificación temporal cambia, ya que en este caso la decisión táctica afecta a varias campañas.

1.6. FUENTES DE INFORMACIÓN PARA LA TOMA DE DECISIONES EN LA AGRICULTURA

El agricultor necesita saber cómo responde el cultivo a diferentes prácticas agrícolas en un entorno particular (suelo y clima). Además, con el fin de tomar decisiones operativas, se necesita información sobre el estado del cultivo y del suelo durante toda la campaña. Las fuentes de información disponibles para el agricultor para tomar decisiones son muy diversas en cuanto a la calidad de la información y al coste asociado con su adquisición. Hoy en día se tiende a considerar la información como un factor de producción más, absolutamente necesario para una agricultura eficiente. Las diferentes fuentes de información disponible sobre cómo responden los cultivos a diferentes prácticas de manejo se discuten a continuación, con la excepción de las nuevas tecnologías y el concepto de Agricultura de ajuste local o de precisión que se presentan en el Capítulo 33.

1.6.1. La experiencia del agricultor

La experiencia del agricultor es la forma tradicional en que se basa toda la actividad agrícola, y puede ser la mejor fuente de información sobre los sistemas agrícolas que varían poco con el tiempo. El conocimiento local es adquirido a lo largo de muchas generaciones e integra las múltiples características del entorno y la sociedad que afectan a la agricultura. Representa el capital humano de una zona rural, que debe ser protegido y preservado. Mientras que el conocimiento tradicional es siempre útil, a veces plantea inconvenientes para la adopción de innovaciones o para adaptarse a nuevas situaciones (cambios en los cultivos o variedades, nuevas tecnologías, aparición de nuevas plagas o enfermedades, etc.).

La complejidad del sistema agrícola en el que interactúan muchos factores bióticos y abióticos, hace que sea difícil interpretar correctamente las respuestas observadas

y lograr una buena comprensión del funcionamiento del sistema basado únicamente en la experiencia. A menudo, un fenómeno en particular puede ser debido a causas que no tienen nada que ver con las causas aparentes.

Un problema adicional es la adopción de prácticas agrícolas, en base a la "experiencia colectiva", que pueden ser perjudiciales a largo plazo, incluso si no causan ningún daño aparente, quedando por tanto fijados en la zona. A modo de ejemplo, podemos citar el laboreo excesivo utilizado durante siglos en muchos sistemas agrícolas. Finalmente, otro inconveniente de utilizar sólo la experiencia como base para la toma de decisiones es la dificultad para detectar los procesos que dañan los recursos naturales a largo plazo. Un ejemplo clásico es la pérdida de suelo por erosión hídrica, difícil de detectar, excepto cuando las lluvias torrenciales crean cárcavas que son obvias. Sin embargo, las medidas correctivas, una vez que se producen cárcavas, ya no son eficaces. Otros problemas como la salinización o la acidificación son muy difíciles de detectar simplemente por la experiencia hasta que el problema es grave y difícil de resolver.

1.6.2. La investigación, la experimentación y la transferencia de tecnología

La investigación conduce a nuevos conocimientos, nuevos procesos o nuevos productos. La investigación y la experimentación son las únicas maneras de producir nuevos conocimientos sobre el manejo de los sistemas agrícolas. En muchos países desarrollados se ha apostado por la inversión en investigación agrícola desde mediados del siglo XIX. Se puede decir que estas inversiones fueron el motor del desarrollo económico de estos países hasta las primeras décadas del siglo XX. Posteriormente, las inversiones en investigación agrícola han sido la base sobre la que se han fundado los notables aumentos en la productividad agrícola desde 1950, hasta el punto de que todos los estudios de impacto muestran que estas inversiones destacan como uno de los mejores negocios del sector público de todos los tiempos. El éxito de la investigación agrícola en los países desarrollados condujo a la creación alrededor de 1960 de una red de centros internacionales de investigación agrícola ubicados en los países en vías de desarrollo como México, Filipinas, India, Nigeria, etc. Estos centros se gestionan y coordinan a través del Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional (CGIAR), que reúne a más de 50 países y organizaciones internacionales y han sido responsables del desarrollo en todo el mundo y la difusión de nuevas variedades de los principales cultivos, y para la introducción de técnicas de manejo para intensificar la producción agrícola de una forma más sostenible.

Para que el conocimiento científico llegue al agricultor y se adapte a sus necesidades, se necesitan instituciones para transferir el nuevo conocimiento en paralelo a las dedicadas a la investigación. Estas instituciones son los servicios de extensión agrícola. El prestigio y la utilidad de los servicios de extensión han sido muy variables en los diferentes países, de acuerdo con la inversión, su tradición y las diversas formas de organización adoptadas. El creciente uso de Internet como fuente de

información y de transferencia de tecnología también ha tenido su impacto en la extensión agrícola. Los servicios de extensión de universidades de Estados Unidos mantienen páginas con información muy prolija para los agricultores de los diferentes estados. Un ejemplo es la página sobre horticultura de la Universidad de California en Davis (http://virc.ucdavis.edu).

La investigación agrícola se basa a menudo en experimentos de campo, que por lo general se realizan en las estaciones experimentales, que son las dedicadas a la investigación y transferencia de tecnología. Los resultados de la experimentación tienen una validez limitada en la agricultura. Como se dijo antes, un conjunto de prácticas agrícolas podría tener resultados diferentes en diferentes años. Lo mismo se aplica a los resultados de un experimento. Así la experimentación agrícola es lenta y costosa (necesita ser repetida varios años). La adopción de los resultados experimentales de un solo año puede dar lugar a errores significativos. Es necesario, por tanto, tener en cuenta los resultados de varios años y, sin embargo, existe incertidumbre en la extrapolación de los resultados a otros entornos. Esta limitación pone de relieve la necesidad de utilizar otras herramientas para complementar la experimentación para la toma de decisiones (Capítulo 33).

1.6.3. Información comercial

Muchos de los insumos necesarios en la agricultura se comercializan y el sector privado ha realizado importantes inversiones en investigación, sobre todo en los últimos años, y es muy activo en la transferencia de tecnología en el sector agrícola. Para los productos y servicios ofrecidos por el sector privado, la transferencia de tecnología es muy eficaz. Sin embargo, hay cuestiones de sistemas de producción agrícola, por ejemplo en el ámbito de la gestión de los recursos, donde hay muchos actores y donde los intereses sociales no siempre coinciden con los intereses del sector privado. Por otra parte, no existen incentivos económicos para que el sector privado genere toda la información que se requiere para la gestión sostenible de los recursos naturales. Si bien la información comercial puede ser muy útil para el agricultor, a menudo se presenta de una manera tal que tiende a sobreestimar los beneficios de los productos. Los ejemplos incluyen el uso indiscriminado de la fertilización foliar y de algunas enmiendas del suelo.

BIBLIOGRAFÍA

Connor DJ, Loomis RS, Cassman KG (2011) Crop ecology: productivity and management in agricultural systems. 2nd ed. Cambridge University Press

Sadras VO, Cassman KGG, Grassini P, Hall AJ, Bastiaanssen WGM, Laborte AG, Milne AE, Sileshi G, Steduto P (2015) Yield gap analysis of field crops – Methods and case studies, FAO Water Reports No. 41, Roma, Italy

Capítulo 2

El suelo. Propiedades biológicas, físicas y químicas

A. DELGADO
J.A. GÓMEZ

RESUMEN:

En este capítulo se ofrece una descripción básica de las propiedades y procesos del suelo, haciendo hincapié en el concepto de que el suelo es una entidad dinámica donde tienen lugar interacciones complejas entre sus componentes físicos, químicos y biológicos. Todos estos componentes y propiedades determinan el funcionamiento del suelo para diferentes propósitos; este funcionamiento está incluido en el concepto de "calidad del suelo". Una de las definiciones más utilizadas de la calidad del suelo es la capacidad de un suelo para funcionar dentro de los límites del ecosistema para sostener la productividad biológica, mantener la calidad del medio ambiente, y promover la sanidad vegetal y animal (https://www.soils.org/publications/soils-glossary). El uso y el manejo del terreno pueden tener un profundo impacto en muchas propiedades del suelo, lo que afecta indirectamente a la calidad del suelo y puede dar lugar a mejoras o limitaciones para la productividad de las tierras agrícolas y la sostenibilidad agrícola a largo plazo.

2.1. INTRODUCCIÓN

Desde el punto de vista de la agricultura, el suelo ofrece sustento a las plantas y actúa como una reserva de agua y nutrientes. Sin embargo, además de ser un medio físico, el suelo puede ser considerado como un sistema vivo, vital para la producción de alimentos y fibra que los seres humanos necesitan y para el mantenimiento de los ecosistemas de los que depende, en última instancia, toda la vida. Los suelos afectan directa e indirectamente la productividad agrícola, la calidad del agua, y el clima global a través de su función como medio para el crecimiento de las plantas, y como regulador del flujo de agua y el ciclo de nutrientes. La estructura del suelo debe ser adecuada para la germinación de las semillas y el crecimiento de las raíces, y debe tener características que permitan el almacenamiento y suministro de agua, nutrientes, gases y calor para el cultivo. La química del suelo está dominada por la interacción entre sus componentes sólidos (principalmente los compuestos insolubles de sílicio, calcio y aluminio) y su fase acuosa. La comprensión de la química del suelo es de suma importancia, ya que es la base de la fertilidad del suelo y proporciona los conocimientos necesarios para entender las diferencias en fertilidad entre los diferentes suelos y su respuesta a la fertilización. A veces la química del suelo puede tener un impacto directo sobre las condiciones físicas del suelo como en el caso de los suelos sódicos, esto es, con alto contenido de sodio intercambiable. El suelo también alberga una compleja red de fauna y flora microbiana involucrada en numerosos procesos biológicos, que también afecta a sus propiedades físicas y químicas, y en última instancia a la productividad de los ecosistemas agrícolas.

Figura 2.1. Perfiles de suelo que muestran dos grados diferentes de desarrollo. Calcaric Cambisol somero (izquierda) y suelo Vertic más profundo (derecha).

Para un suelo dado, sus propiedades dependen de la historia de la formación del suelo (Figura 2.1) y pueden ser modificadas sustancialmente por el ser humano (por ejemplo, a través de las prácticas agrícolas). Una adecuada comprensión de las características del suelo y la interpretación adecuada de las magnitudes de sus propiedades, ambos combinados bajo el término más amplio de la calidad del suelo (Tabla 2.1), es necesaria para la correcta gestión de los suelos agrícolas.

Tabla 2.1. Algunas propiedades del suelo se utilizan normalmente en la evaluación de la calidad del suelo.

Propiedad del suelo			
Físico	Textura	Densidad aparente	Tasa de infiltración
Químico	Capacidad de intercambio catiónico	Concentración de carbono orgánico	pH
Biológico	Respiración del suelo	Presencia de lombrices de tierra	Biodiversidad microbiana

2.2. DINÁMICA DE LA FORMACIÓN DEL SUELO Y LA PÉRDIDA DE SUELO

La génesis del suelo se refiere a los procesos de desarrollo que el suelo, como una entidad natural, ha llevado a cabo durante períodos de tiempo largos como resultado de las complejas interacciones entre procesos biológicos, físicos y químicos, como se describe en la Figura 2.2. Los procesos de formación del suelo por lo general se refieren a los resultados de la interacción de procesos de diferente naturaleza, tales como la acumulación de los componentes del suelo (por ejemplo, materia orgánica), la formación *in situ* de otros nuevos (por ejemplo, minerales de arcilla u óxidos), el transporte dentro del perfil del suelo (por ejemplo, arcilla, carbonatos o sales solubles), o cambios en el estado de agregación de las partículas del suelo (por ejemplo, la formación de una estructura). Como se ha mencionado en el apartado 2.1, estos procesos van a definir el tipo de suelo y pueden afectar en gran medida la calidad del suelo.

La profundidad de suelo disponible para el crecimiento de las plantas (la profundidad del perfil del suelo que puede ser explorado por las raíces de las plantas, que también se denomina profundidad de suelo enraizable), es un factor determinante en la agronomía, ya que afecta en gran medida el desarrollo del cultivo en general y la productividad del suelo. Dicha profundidad es el resultado del equilibrio entre las velocidades de formación y erosión del suelo. La velocidad a la que se forma el suelo es extremadamente baja y depende de la geología (propiedades de la roca madre) y las condiciones climáticas. Por lo general la tasa es inferior a 5 mm por siglo (aunque el intervalo es amplio, de 0.01 a 40 mm por siglo). En zonas no sometidas a rápidas transformaciones geológicas, como por ejemplo, elevaciones alpinas, las

tasas de formación de los suelos tienden a estar en equilibrio con las tasas de erosión bajo vegetación natural. Las tasas de erosión natural oscilan entre 0.005 y 60 mm por siglo, y son principalmente el resultado de la erosión hídrica y eólica y el movimiento de masas por las fuerzas gravitatorias.

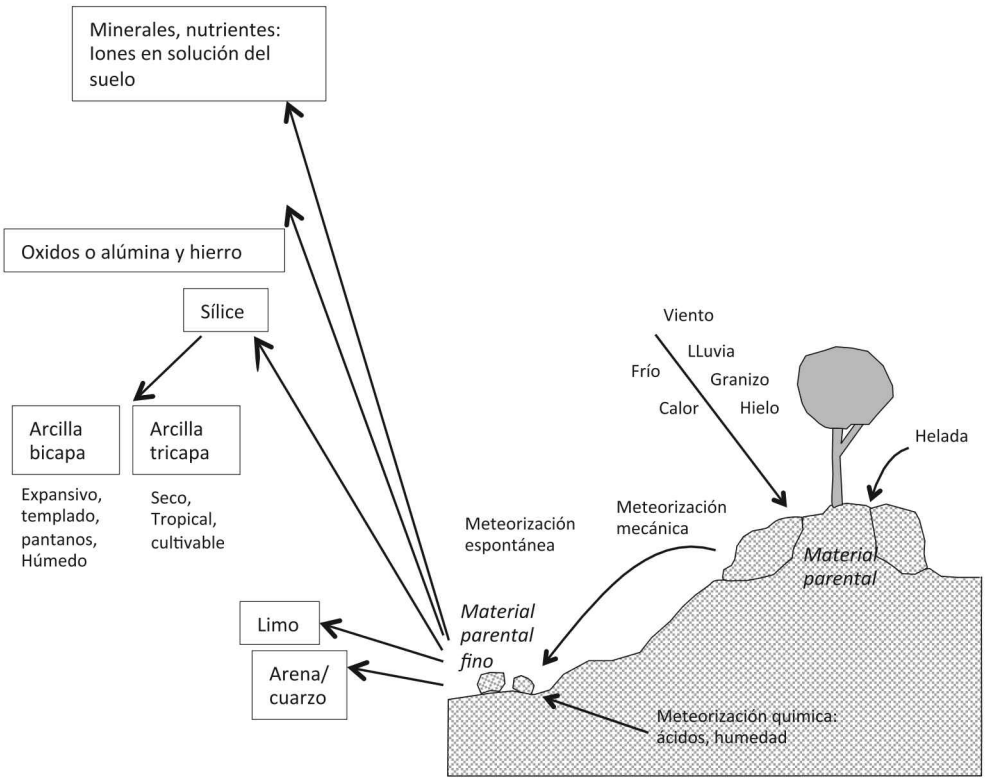


Figura 2.2. Descripción de los procesos clave en la formación del suelo

Las intervenciones humanas, principalmente mediante la eliminación de la cubierta vegetal protectora pueden dar lugar a tasas de erosión aceleradas cuando el uso de la tierra o las prácticas de manejo del suelo son inadecuados. Estas tasas de erosión acelerados pueden alcanzar hasta 50 mm *por año,* lo que resulta en una reducción de la profundidad del perfil del suelo y en su degradación. Alcanzar tasas de erosión sostenibles es un objetivo importante de las prácticas de conservación de suelos. Estas tasas se definen como aquellas que o bien se aproximan a las tasas de formación del suelo o, al menos se sitúan por debajo de una determinada tasa considerada aceptable (habitualmente por debajo de 10-100 mm por siglo) que pospone hacia un futuro lejano el impacto del desequilibrio entre la formación y la erosión del suelo. El uso de técnicas de conservación de suelos tiene por objeto reducir las tasas de erosión a valores en el rango de 0.003 a 60 mm por siglo para lograr una agricultura más sostenible.

2.3. PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO: TEXTURA Y ESTRUCTURA

Las propiedades físicas del suelo determinan muchos de los procesos clave del mismo (Figura 2.3), y por tanto, el potencial agronómico de un suelo. La textura del suelo, que es una descripción de la distribución del tamaño de las partículas minerales que componen la fracción sólida del suelo (desde arcilla <2 micras a partículas gruesas > 2000 micras), es quizás la más importante. La textura determina muchas otras propiedades físicas (como la tasa de infiltración) y algunas propiedades químicas (como la capacidad de intercambio catiónico). La mineralogía de las arcillas influye en las propiedades físicas y químicas de los suelos, como la expansión/contracción de los vertisoles, que son suelos en los que la arcilla es de tipo expansivo.

La estructura del suelo describe la disposición de las partículas minerales y de la materia orgánica del suelo, y en particular la disposición de los poros entre estas partículas, y también la estabilidad de esta disposición frente a fuerzas externas tales como el tráfico de maquinaria o el impacto de las gotas de lluvia. En contraste con la textura, la estructura del suelo puede ser modificada sustancialmente por el manejo del suelo. La distribución del espacio poroso y la textura determinan las propiedades de retención de agua del suelo (véase el Capítulo 8) que se caracterizan por la relación entre el contenido de agua y el potencial hídrico (tensión) del suelo. Esta relación está determinada por la estructura del suelo y la distribución del tamaño de poros, cuando el suelo está húmedo (baja tensión) y por la textura del suelo cuando el suelo está seco. La densidad aparente, esto es, la relación entre la masa seca del suelo y su volumen, es una propiedad muy importante que influye en la retención de agua del suelo, la aireación, la transitabilidad, y la velocidad de infiltración, y es extremadamente sensible al manejo del suelo. La porosidad media del suelo (calculada como P = 1 - densidad aparente/densidad de las partículas de suelo, tomada generalmente como 2.65 t / m^3) es un parámetro muy útil. La resis-

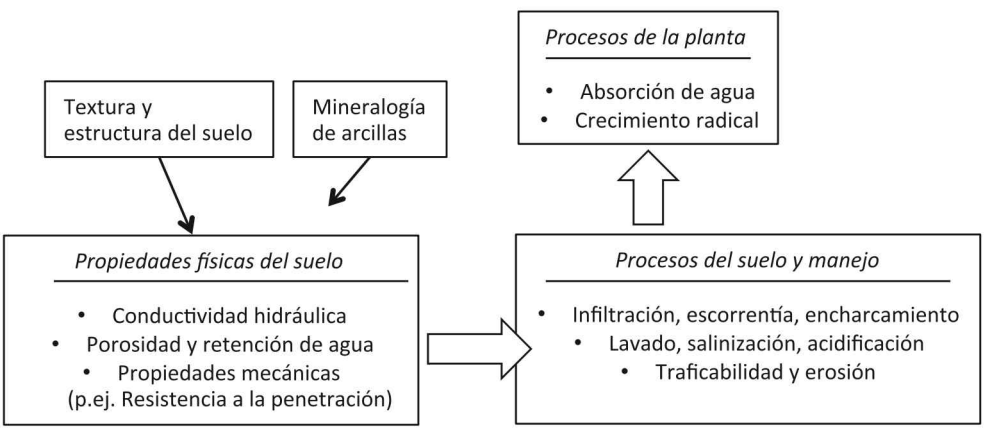


Figura 2.3. Descripción de las principales propiedades físicas del suelo, los procesos del suelo relacionados y los problemas de manejo. Adaptado de Geeves *et al.* (2002).

tencia mecánica del suelo refleja la resistencia ofrecida a la penetración y está directamente relacionada con la compactación del suelo. La resistencia mecánica de los suelos aumenta bruscamente cuando el suelo se seca y se utiliza para complementar la información proporcionada por la densidad aparente.

La permeabilidad del suelo es un término amplio utilizado para definir la capacidad del suelo para la transmisión de agua. Es importante entender la dinámica del agua y el balance de agua del suelo (Capítulo 8) para un manejo adecuado del riego (Capítulos 19 y 20). La permeabilidad viene determinada en parte por la textura; así los suelos arenosos presentan una alta permeabilidad en comparación con los suelos arcillosos. La permeabilidad puede ser alterada por el manejo del suelo, por ejemplo, con laboreo (Capítulo 17). Otros parámetros que reflejan las propiedades de transmisión de agua del suelo son la velocidad de infiltración, esto es, el flujo de agua a través de la superficie del suelo, y la conductividad hidráulica, que es la capacidad de un suelo para conducir el agua, un parámetro muy sensible al contenido de agua del suelo.

Las partículas del suelo y el espacio poroso, con su continuidad y tamaños, están dispuestos en agregados que definen la estructura del suelo. Las propiedades físicas, químicas y biológicas afectan a la estructura del suelo proporcionando medios que ayudan a mantener unidos los agregados del suelo. La estructura afecta a muchas propiedades del suelo que son relevantes en agronomía. La penetración de las raíces de las plantas, el movimiento y el almacenamiento de agua en el suelo, la aireación y la resistencia mecánica de un suelo son algunas de las propiedades más relevantes influenciadas por la forma en que los agregados del suelo están agrupados en una estructura. Algunas técnicas de cultivo muy comunes como el laboreo pueden cambiar la estructura del suelo muy rápidamente. Tales cambios son reversibles a corto plazo, pero la degradación a largo plazo de la estructura del suelo es un problema grave ya que se asocia con una disminución de la infiltración del agua y el aumento del riesgo de erosión. La materia orgánica desempeña un papel importante en la formación de agregados y su disminución a largo plazo contribuye a la pérdida de la estabilidad estructural del suelo.

2.4. PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO

2.4.1. pH

El pH del suelo es el de la disolución del suelo que está en equilibrio con protones (H^+) retenidos por los coloides del suelo (arcillas, materia orgánica, óxidos). El pH del suelo se determina en el laboratorio en suspensiones de suelo en agua o disoluciones salinas (por lo general 0.1 M $CaCl_2$ o 1 M KCl). El grado de acidez o alcalinidad de un suelo es una propiedad muy relevante que afecta a muchas otras propiedades físico-químicas y biológicas. Los problemas derivados de *los suelos ácidos* o la acidificación de los suelos agrícolas se pueden superar mediante el aumento de la saturación de bases y pH con enmiendas del suelo (encalado). Los suelos básicos o alcalinos son la consecuencia de la amortiguación del pH del suelo por elementos de

carácter básico o por la presencia de compuestos que tamponan el pH tales como los carbonatos. Los suelos *calcáreos* son los que tienen una concentración apreciable de $CaCO_3$ que tampona el pH del suelo alrededor de 8.5. La presencia de otros carbonatos (Mg o Na en suelos sódicos) puede tamponar el pH del suelo muy por encima de 8.5. El pH de un suelo calcáreo no se puede cambiar debido a su alto poder tampón. Sus limitaciones de uso agrícola, principalmente en relación con las restricciones en la absorción de nutrientes y en la nutrición de la planta, pueden ser superadas con productos fertilizantes especiales y estrategias adecuadas de fertilización.

Algunas de las características de la fertilidad del suelo afectadas por el pH son las siguientes:

a) La solubilidad de elementos minerales en el suelo. A pH bajo, los riesgos de deficiencia de nutrientes básicos (Ca, Mg y K) aumentan debido a su bajo contenido; también la solubilidad de compuestos de Mo y P se reduce, lo que disminuye su disponibilidad. Por el contrario, se aumenta la concentración de Al (por lo general a pH <5.5) y por lo tanto sus efectos tóxicos; la concentración de Fe y Mn, nutrientes esenciales para las plantas, puede ser lo suficientemente alta a pH ácido como para causar toxicidad. A pH básico, la solubilidad de muchos metales y elementos traza se reduce, incluyendo nutrientes esenciales para las plantas, tales como Fe, Mn, Cu o Zn. La deficiencia de Fe, conocida como *clorosis férrica,* es frecuente en suelos básicos (por lo general en los calcáreos).

b) Propiedades biológicas: los valores extremos de pH disminuyen la actividad microbiana en los suelos, lo que afecta a muchos procesos (por ejemplo, la descomposición de la materia orgánica, la nitrificación y la fijación simbiótica de N_2 en condiciones ácidas) (véase el Capítulo 24.).

c) Propiedades físicas: la baja concentración de Ca en suelos ácidos suele estar relacionada con un aumento de la dispersión de los coloides si no hay una alta concentración de Al. Por lo tanto, los suelos ácidos pueden tener propiedades físicas inadecuadas, incluida la mala estabilidad estructural o baja permeabilidad.

2.4.2. Estado redox

El estado redox de un suelo está determinado por la disponibilidad de electrones que pueden participar en reacciones de óxido-reducción (PE, - logaritmo de la actividad de electrones) y se controla por las condiciones físicas (contenido de agua y porosidad) y la actividad biológica. Afecta a la solubilidad y especiación de elementos con diferentes estados redox, tales como N, S, Fe, Mn, algunos elementos traza tóxicos (por ejemplo, As, Se), e incluso C. Las condiciones reductoras en suelos agrícolas se producen normalmente con contenidos muy altos de agua (saturación), ya que, en estas condiciones, el oxígeno se consume rápidamente por la actividad biológica. Las condiciones reductoras aumentan la solubilidad de los compuestos de Fe y Mn. Esto mejora la absorción de estos nutrientes por las plantas (que pueden llegar a ser tóxicos) y la de los elementos adsorbidos a los óxidos de Fe y Mn (por ejemplo, P y metales pesados).

2.4.3. Retención de iones en el suelo

Los iones pueden ser retenidos en los suelos mediante los procesos de precipitación y de adsorción. La *precipitación* significa la formación de una nueva fase sólida, por ejemplo cuando el fertilizante P se aplica a un suelo con una alta concentración de Ca, se pueden formar cristales de fosfato de Ca. *La adsorción* es la acumulación de especies químicas (adsorbato) en la superficie de un sólido existente en el suelo (adsorbente). Las especies precipitadas y adsorbidas están en equilibrio con la disolución del suelo (precipitación/disolución y equilibrio adsorción/desorción).

La adsorción puede ser la consecuencia de reacciones químicas con grupos funcionales de las superficies adsorbentes que es específica de cada adsorbato (por ejemplo, P en superficies hidroxiladas), o por atracción electrostática de la superficie adsorbente que no es específica del adsorbato. La carga asociada a las superficies minerales y orgánicas puede ser permanente o variable. La carga permanente surge de la sustitución isomórfica dentro de minerales de la arcilla. La carga variable es el resultado de enlaces no compensados en bordes de minerales y en la materia orgánica y es dependiente del pH.

2.4.3.1. Capacidad de intercambio

Los iones intercambiables son aquellos débilmente adsorbidos por las partículas del suelo que pueden ser desplazados de los sitios de adsorción por otros iones en la disolución. Los iones intercambiables son esenciales para mantener las reservas de nutrientes de las plantas que hay en el suelo.

La *Capacidad de intercambio catiónico* (CEC) se mide como la cantidad de cationes (expresada como equivalentes) que se pueden extraer por una disolución con una concentración elevada de un determinado catión (por lo general, 1 M K^+ o NH_4^+). La CEC está generalmente dominada por Ca, Mg, Na, K, Al, y protones. La selectividad o afinidad relativa de un catión por las superficies adsorbentes depende de la carga del ión y de su tamaño: cuanto menor es el radio hidratado (las moléculas de agua y los cationes interactuando fuertemente por la interacción ion-dipolo) mayor es la afinidad (los iones con pequeño radio deshidratado tienen gran radio hidratado), y cuanto mayor es la valencia mayor será también la afinidad de la superficie adsorbente por ese catión. La escala de afinidad para los cationes dominantes en los suelos se puede resumir como sigue:

$$Al^{3+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > NH_4^+ > K^+ > Na^+$$

La *saturación de bases* se define como la relación entre los cationes de carácter básico intercambiables (Ca, Mg, K, Na) y la CEC total, y disminuye conforme se reduce el pH del suelo. Ca, Mg y K son nutrientes para las plantas; así, una saturación de bases alta significa una mayor reserva de nutrientes que una baja saturación de bases para la misma CEC. La baja saturación de bases en suelos ácidos puede determinar la deficiencia de Ca para los cultivos. Con el fin de garantizar unas buenas propiedades físicas del suelo (agregación del suelo, estabilidad de la estructura, buena aireación y drenaje) y una correcta nutrición de los cultivos, el calcio debe

ser el catión dominante en el complejo de cambio (lo ideal es > 50% de la CEC). También es deseable que la relación Ca/Mg sea 5-10 y la relación K/Mg esté en el intervalo 0.2-0.3 con el fin de evitar desórdenes nutricionales (antagonismos) en las plantas que pueden conducir a una deficiencia de un nutriente originada por un alto nivel del nutriente antagónico.

2.4.4. Salinidad y sodicidad

La salinidad se define como una alta concentración de sales solubles (más solubles que el yeso) en los suelos. Un suelo salino tiene una concentración de sal soluble suficientemente alta como para afectar negativamente al crecimiento de las plantas cultivadas. La clasificación de suelos salinos y la evaluación de los efectos negativos de la salinidad en los cultivos se basan en la conductividad eléctrica (EC) del extracto saturado del suelo. Si la EC de un suelo es mayor de 4 dS/m, éste se considera salino. Hay una amplia variación en las respuestas a la salinidad de los distintos cultivos (Capítulo 22). Los cultivos altamente sensibles a la salinidad (por ejemplo, zanahoria, haba, fresa) se ven afectados cuando los valores de EC son ligeramente superiores a 1 dS/m. Los cultivos tolerantes como la cebada o la remolacha, pueden tolerar niveles de EC por encima de 4 dS/m. El efecto de la salinidad sobre el crecimiento de las plantas es causado por efectos osmóticos (disminución del potencial de agua en el suelo), y de toxicidad específica debido habitualmente a las altas concentraciones de Cl o Na.

La sodicidad hace referencia a una alta concentración de Na intercambiable en el suelo. Las sales de Na son comunes en suelos salinos, por lo que ambos problemas suelen estar relacionados. El Na es un catión monovalente con un gran radio hidratado. Por lo tanto, un alto contenido de Na adsorbido en los coloides del suelo promueve su dispersión, lo que afecta negativamente a las propiedades físicas del suelo. Un suelo se clasifica como sódico si el porcentaje de sodio intercambiable (ESP) representa más del 15% de la CEC. Sin embargo, los cultivos sensibles a la toxicidad por Na se ven afectados por ESP> 7 (por ejemplo, melocotón, cítricos, fresa). Los problemas en los cultivos tolerantes a la toxicidad por Na (por ejemplo algodón o centeno) por lo general se derivan de la degradación física del suelo. Los suelos con EC> 4 dS/m y ESP>15 se clasifican como salino-sódicos. Los problemas derivados de suelos sódicos también pueden estar relacionadas con sus valores de pH muy altos (por lo general> 8.5 si el suelo no es salino).

En el Capítulo 22 se detalla el problema de la salinidad en la agricultura y se describen los métodos para su gestión y control.

2.5. PROPIEDADES BIOLÓGICAS DEL SUELO

Los suelos albergan una compleja **red de organismos** (Figura 2.4) que pueden influir en la evolución del suelo y en sus propiedades físicas y químicas. Por ejemplo, la actividad de las lombrices de tierra aumenta la velocidad de infiltración, o la actividad microbiana disminuye la materia orgánica del suelo mediante su mineralización.

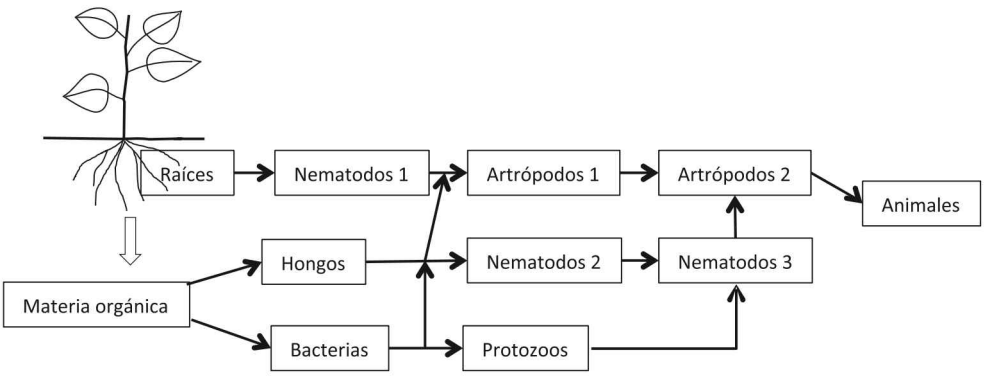


Figura 2.4. Red trófica del suelo.

Las propiedades biológicas del suelo también están interconectadas con otras propiedades físicas y químicas del suelo. Por ejemplo, la aireación, la materia orgánica del suelo o el pH afectan a la actividad de muchos microorganismos de los suelos que a su vez llevan a cabo actividades relevantes en los ciclos del carbono y de los nutrientes. Algunos ejemplos de esta interconexión se recogen en el apartado 2.4. Por lo tanto, los cambios en las propiedades del suelo debidos al manejo pueden afectar significativamente a las propiedades biológicas de los suelos, y algunas de ellas son extremadamente sensibles. Por ejemplo, la actividad microbiana del suelo se puede incrementar en gran medida por un mejor drenaje, el encalado o enmiendas orgánicas. Por ello, algunas propiedades biológicas del suelo pueden ser utilizadas como indicadores indirectos de la bondad del manejo del suelo y de su calidad, como la tasa de respiración del suelo o algunas actividades enzimáticas que se derivan de organismos que viven en el suelo.

La materia orgánica del suelo es un factor clave que afecta a la actividad biológica de los suelos. Es la fuente de carbono para muchos organismos, incluyendo la microbiota del suelo. No sólo la cantidad, sino también el tipo de compuestos orgánicos, determinan la actividad biológica del suelo; por ejemplo, la actividad microbiana se incrementa en gran medida por la incorporación de residuos frescos orgánicos (tales como estiércol o abonos verdes), que pueden ser fácilmente mineralizados por los microorganismos. Por otra parte, las formas estables de materia orgánica (compuestos húmicos y fúlvicos), que constituye la mayor parte de la materia orgánica de los suelos en las regiones templadas, no es una fuente de carbono muy adecuada para la microbiota del suelo, lo que explica la larga vida media de estos compuestos en los suelos (generalmente > 1000 años). Por lo tanto, los compuestos orgánicos estables no contribuyen significativamente a la actividad microbiana del suelo, sino que constituyen una reserva de C estabilizada que es muy relevante para el ciclo global del C, amortiguando en parte las consecuencias del aumento de las emisiones de C a la atmósfera.

La **rizosfera** es el volumen de suelo alterado por el sistema de la raíz y es la parte del perfil del suelo donde la concentración de compuestos de C fácilmente utiliza-

ble como fuente de energía por muchos microorganismos es mayor. Los compuestos orgánicos exudados por las raíces de las plantas (incluyendo aniones orgánicos de bajo peso molecular) alteran las propiedades químicas del suelo y aumentan en gran medida la actividad biológica en comparación con el resto del volumen del suelo. La rizosfera es un espacio de intensa interacción de las raíces de las plantas con los microorganismos del suelo. Los microorganismos rizosféricos pueden afectar de manera significativa el crecimiento de las plantas a través de la producción de reguladores de crecimiento, al disminuir la incidencia de algunas enfermedades y por el aumento de la disponibilidad de nutrientes.

La comprensión de las propiedades biológicas del suelo no es sólo importante para su manejo, sino también para la prevención y el control de plagas y enfermedades de los cultivos. Muchas de las propiedades indicadas en la Tabla 2.2 son una descripción de la diversidad y la actividad de las partes de la red alimentaria del suelo, o de propiedades relacionadas, tales como la tasa de respiración del suelo o el contenido de materia orgánica.

Tabla 2.2. Algunas propiedades biológicas del suelo.

Propiedad	Comentarios
Tasa de respiración	Emisión de CO_2 bajo condiciones estándar de laboratorio o en el campo.
Mineralización potencial de C o N	Aumento en el contenido de N mineral o C en condiciones normales de laboratorio
Lombrices de tierra	Densidad de lombrices de tierra
Biomasa bacteriana	Biomasa bacteriana total para una masa de suelo dado
Diversidad bacteriana	Se puede determinar por grupos funcionales, o describir la diversidad genética
Presencia de patógenos	Por diferentes técnicas de patología, desde cultivos hasta perfiles de ADN

2.6. LOS CICLOS Y BALANCES DE NUTRIENTES EN EL SUELO

Los nutrientes en los suelos están presentes en diferentes formas químicas, que pueden permanecer en disolución o unidas a las partículas del suelo. El intercambio de nutrientes entre las diferentes formas o reservas se rige por procesos biológicos, físicos o químicos. Todos estos procesos se incluyen en el concepto de "ciclo de los nutrientes" en el suelo. Puesto que el suelo no es un sistema cerrado, las ganancias o pérdidas de nutrientes ocurren desde/hacia la atmósfera o las masas de agua (por lixiviación o erosión), que unen el ciclo de los nutrientes del suelo con el ciclo global de los nutrientes en la superficie terrestre. Los ciclos de nutrientes del suelo y el ciclo global se ven afectados por las actividades humanas. En los suelos agrícolas, la fertilización altera claramente el ciclo, al introducir nutrientes en el sistema. Sin este

suministro, la entrada natural de nutrientes en los suelos sería mucho más baja que las extracciones típicas de los cultivos, induciendo así un "balance negativo" lo que causaría un agotamiento progresivo de los nutrientes y de este modo una pérdida progresiva de la fertilidad del suelo.

Un ciclo de nutrientes genérico está representado en la Figura 2.5. El flujo de nutrientes hacia las raíces de las plantas proviene de la disolución del suelo, principalmente como iones disueltos. La reserva lábil de nutrientes es la que se equilibra rápidamente con la disolución del suelo e incluye los iones adsorbidos (sección 2.4.3.1), las sales solubles precipitadas y los presentes en los compuestos orgánicos que son fácilmente mineralizados. La reserva disponible de nutrientes es la cantidad en disolución más aquella que se equilibra fácilmente con la disolución (formas lábiles). Esa reserva disponible para un determinado nutriente se puede considerar la cantidad que se puede extraer por cultivos sucesivos hasta la ocurrencia de una deficiencia severa del nutriente. Las interacciones químicas (por ejemplo, de adsorción/desorción o precipitación/solubilización) o biológicas (inmovilización/mineralización) que afectan a los equilibrios de nutrientes y a los intercambios entre la fracción lábil de la fase sólida del suelo y la disolución del suelo determinan en última instancia la actividad iónica en la disolución y el transporte de nutrientes a las raíces de las plantas.

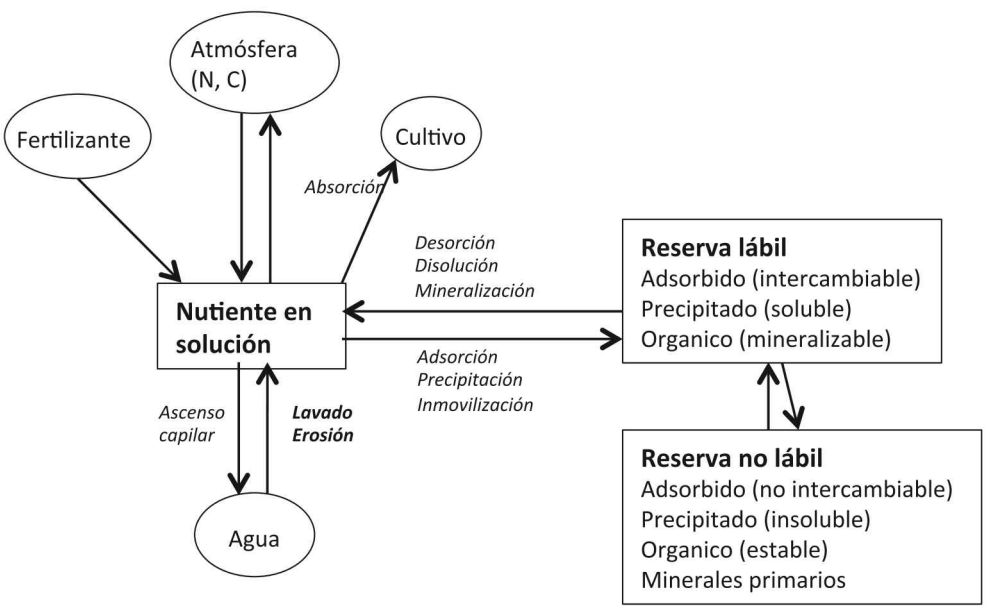


Figura 2.5. Ciclo general de los nutrientes en el suelo. En cursiva procesos físicos, químicos o biológicos implicados en el ciclo de nutrientes. La incorporación de residuos al suelo implica el reciclaje de nutrientes: no sólo en formas solubles (por ejemplo, K); la mayoría en formas orgánicas o ligadas a compuestos orgánicos que pueden convertirse en parte de la reserva lábil o de la no lábil. El intercambio entre las formas lábiles y no lábiles implica los mismos procesos que los implicados en el equilibrio entre las formas lábiles y la solución.

La estimación precisa de las necesidades de fertilizantes en la agricultura moderna se basa en el conocimiento de los ciclos de nutrientes y en la medida de las reservas disponibles de nutrientes en los suelos a través de métodos químicos. Se consideran nutrientes móviles aquellos que no están unidos a las partículas del suelo. El nitrógeno, a pesar de que el amonio se adsorbe, se transforma fácilmente a nitrato, que no se adsorbe en las partículas del suelo. En los sistemas agrícolas, donde la contribución al conjunto de nutrientes disponibles por mineralización de la materia orgánica es generalmente baja, los principales contribuyentes a la reserva disponible de los nutrientes móviles son los iones inorgánicos en la disolución del suelo. Los nutrientes inmóviles son aquellos que están unidos a las partículas del suelo a través de adsorción o por los procesos de precipitación, siendo en este caso la reserva lábil el principal contribuyente a la reserva disponible. Los nutrientes inmóviles, tales como P, K, Ca, o Mg, son menos susceptibles de pérdida a través de lixiviación. Por otra parte, la naturaleza de las reacciones químicas que intervienen en su retención hace que sólo una parte de los nutrientes suministrados como fertilizante estén disponibles para las plantas.

BIBLIOGRAFÍA

European Soils Portal (http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/).

Ewing SA, Singer MJ (2012). Soil quality. En: Huang PM, Li Y, Sumner ME (eds) Handbook of Soil Sciences: Resource Management and Environmental Impacts, 2ª ed. CRC Press, Boca Raton FL. p 26(1-28).

FAO Soils Portal (http://www.fao.org/soils-portal/en/).

Heil D, Sposito G (1997) Chemical attributes and processes affecting soil quality. En: Gregorich EG, Carter MR (eds) Soil quality for crop production and ecosystem health. Elsevier Scientific, Amsterdam.

Geeves GW, Craze B, Hamilton GJ (2001) Soil physical properties. En: Charman PEV, Murphy BW (eds) Soils: their properties and management. Oxford.

Mass EV (1996) Crop salt tolerance. En:Tanji KK (ed) Agricultural salinity assessment and management. American Society of Civil Engineers, New York.

Montgomery DR (2007) Soil erosion and agricultural sustainability. Proc Nat Acad Sci104: 13268-13271.

National Resources Conservation Service, (http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/soils/health/biology/).

Rawls WJ, Brakensiek DL (1989) Estimation of Soil Water Retention and Hydraulic Properties. Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling.NATO ASI Series Vol 275, p 275-300.

Thompson A, Goyne KW (2012) Introduction to the Sorption of Chemical Constituents in Soils. Nature Education Knowledge 3(6):15

Palm C, Sánchez P, Ahamed S, Awiti A (2007) Soils: a contemporary perspective. Annu Rev Environ Resources 32:99–129.

Capítulo 3

El balance de radiación

F.J. VILLALOBOS
J.P. DE MELO ABREU
L. MATEOS
E. FERERES

RESUMEN:

La radiación solar (onda corta) es la fuente de energía para la fotosíntesis, el calentamiento y la evaporación en los sistemas agrícolas. Su valor se puede calcular en función de la latitud, el día del año y la nubosidad. El cincuenta por ciento de la radiación solar puede ser aprovechada para la fotosíntesis y se llama radiación fotosintéticamente activa (PAR), aunque sólo una fracción muy pequeña se utiliza realmente en este proceso. La radiación neta se obtiene descontando de la radiación solar la radiación solar reflejada (que depende del albedo) y las pérdidas de onda larga que dependen de la temperatura y la humedad del aire y de la nubosidad. Las plantas interceptan todos los tipos de radiación. La interceptación de radiación de onda corta depende de la distribución de ángulos foliares que varía según la especie y del Indice de Area Foliar (LAI). La fracción de radiación interceptada por un árbol puede ser calculada asumiendo formas geométricas simples para la copa (esferoide).

3.1. INTRODUCCIÓN

La radiación electromagnética es el fenómeno físico básico que determina el ambiente de los cultivos. La radiación solar, que es radiación de onda corta, constituye la fuente principal de energía para la producción de los cultivos. Además, tenemos que considerar la radiación térmica de onda larga emitida por cualquier objeto en el planeta, incluyendo el suelo, los cultivos, el agua y la atmósfera. Por otra parte, la calidad de la luz, es decir, su composición en diferentes longitudes de onda, juega un papel clave en muchos procesos de desarrollo de las plantas, como se discutirá en el Capítulo 11.

La energía total emitida para todo el espectro electromagnético se calcula por la Ley de Stefan-Boltzmann:

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \tag{3.1}$$

Donde ε es la emisividad (o la eficiencia del cuerpo en la emisión de radiación), σ es la constante de Stefan-Boltzmann (5.67 10^{-8} W/m^2/K^4) y T es la temperatura absoluta de la superficie del cuerpo emisor. Esta ley se aplica a cualquier objeto, ya sea el Sol o la superficie de la tierra. En el intervalo de longitud de onda entre 8 y 14 micras, la emisividad de las superficies de las plantas está entre 0.97 y 0.99, que es bastante similar a la de un "cuerpo negro", que por definición tiene unidad de emisividad.

3.2. LA RADIACIÓN SOLAR

La densidad de flujo de radiación solar en el límite de la atmósfera (radiación extraterrestre), sobre una superficie perpendicular a los rayos solares, cuando el Sol y la Tierra están a una distancia media, se llama la "constante solar" y su valor varía entre 1350 y 1400 W/m^2, con un valor medio de 1370 W/m^2.

Si consideramos una superficie horizontal, si el rayo de sol y la normal a la superficie no son paralelos, la densidad de flujo se puede calcular por la ley del coseno o ley de Lambert:

$$I = I_p \cos\theta \tag{3.2}$$

donde θ es el ángulo cenital (ángulo entre el haz radiante y la vertical) y I_p es la densidad de flujo en la dirección del rayo.

El ángulo cenital para una superficie horizontal en el planeta depende de la latitud (λ_s), la declinación solar (δ_s) y la hora del día (expresada como ángulo horario, h_a, que varía de 0 a 360º, tomando el valor de 0º al mediodía solar):

$$\cos\theta = \operatorname{sen}\lambda_s \operatorname{sen}\delta_s + \cos\lambda_s \cos\delta_s \cos h_a \tag{3.3}$$

La declinación solar oscila entre + 23.45º en el solsticio de verano (hemisferio norte) y -23.45º en el solsticio de invierno y se puede calcular (en grados) como:

$$\delta_s = 23.45 \cos\left[\frac{360\ (DOY - 172)}{365}\right] \tag{3.4}$$

donde DOY es el día del año (DOY = 1 para el 1 de enero y DOY = 365 para el 31 de diciembre).

Ejemplo 3.1.

El 1 de febrero (DOY 32) en Córdoba, España (λ_s= 37.85ºN) la declinación solar es

$$\delta_s = 23.45 \cos\left[\frac{360\ (32 - 172)}{365}\right] = 23.45 \cos(-138^o) = -17.4^o$$

Tres horas después del mediodía solar: h_a= (15-12)·15 = 45º, por lo tanto:

$$\cos\theta = \text{sen}(37.85)\,\text{sen}(-17.4) + \cos(37.85)\cos(-17.4)\cos(45) = 0.35$$

y entonces $\theta = \text{arc}\cos(0.35) = 69.5^o$.

La hora oficial se obtiene sumando o restando un cierto número de horas a la hora estándar, además de un horario de verano (que añade normalmente una hora). Por ejemplo, en la mayor parte de Europa Occidental (Francia, Alemania, España) hay una hora de diferencia en el período de otoño e invierno y dos horas en primavera y verano (horario de verano). Para calcular el tiempo solar real hay que tener en cuenta la longitud del lugar ya que la ruta del sol hacia el oeste tiene una velocidad aparente de 15º por hora. Vamos a ignorar en este libro, por simplificar, otros fenómenos relacionados con la rotación de la Tierra que puede cambiar hasta 16 minutos nuestras predicciones del tiempo solar.

Ejemplo 3.1.

Santiago de Compostela (España) se encuentra situado a 42.9ºN y 8.43ºO. Vamos a calcular la hora solar a las 1500 h (hora oficial) el 1 de mayo.

Como la fecha corresponde al período primavera-verano, la hora solar en el meridiano estándar (en este caso el meridiano de Greenwich) será:

15 – 2 = 13 horas

Luego restamos 1 hora por cada 15º de longitud al Oeste:

13 – 8.43 · 1/15 = 12.44 horas, lo que significa que la hora solar real es 12:26.

En ecología de cultivos y agronomía, estamos especialmente interesados en tres bandas principales en el espectro de la radiación solar que llega al exterior de la atmósfera. Las bandas de ondas infrarrojas y visibles representan aproximadamente el 51% y el 40% de la constante solar, respectivamente, mientras que la banda de onda ultravioleta supone aproximadamente el 9%. La banda de onda visible, que va de 400 a 700 nm, es también la radiación fotosintéticamente activa (PAR), aunque sólo una pequeña fracción de esta radiación se invierte realmente en este proceso. La PAR se puede expresar como densidad de flujo de radiación (W/m^2) o como densidad de flujo de fotones ($mol//m^2/s$).

A medida que los rayos del sol atraviesan la atmósfera, la radiación se altera en cantidad, calidad y dirección, por los procesos de absorción y dispersión. La absorción, que es un cambio de energía radiante a calor, da como resultado el calentamiento de la atmósfera y una reducción de la cantidad de energía radiante que llega a la tierra. La absorción se debe principalmente a ozono y oxígeno, especialmente en la banda de ondas ultravioleta, y al vapor de agua y dióxido de carbono, en la banda de infrarrojos. Algunos aerosoles pueden también absorber radiación de onda corta. La dispersión se produce cuando los fotones chocan contra las moléculas que componen y las partículas y aerosoles de la atmósfera, causando cambios en la dirección de la radiación, pero sin reducir la energía de la radiación. En la región visible del espectro, la absorción por las moléculas de la atmósfera es menos importante que la dispersión, mientras que en los infrarrojos ocurre lo contrario. La radiación solar en la superficie de la tierra, medida perpendicularmente a los rayos del sol, rara vez supera el 75% de la constante solar, debido a la absorción y a la dispersión.

3.3. LA RADIACIÓN SOLAR A NIVEL DEL SUELO

Como resultado de la atenuación atmosférica, la radiación solar que llega a la superficie terrestre ya no es sólo la que viene con los rayos solares sino que además se recibe radiación que procede de todas las direcciones. La radiación que viene directamente del sol se llama *radiación solar directa* y la parte restante se denomina *radiación solar difusa,* siendo ésta la radiación dispersa en la atmósfera que llega a la superficie procedente de todo el hemisferio celeste. La suma de la radiación solar directa y difusa, medida sobre una superficie plana horizontal, se llama *radiación global,* radiación *total* o simplemente *radiación solar.* En promedio, la PAR representa el 50% del flujo de la radiación global, mientras que en la radiación extraterrestre representa sólo el 40%.

En general, la relación entre radiación difusa y radiación directa aumenta con la latitud y con el ángulo cenital ya que el trayecto de los rayos solares a través de la atmósfera se alarga. Esto implica que tanto al amanecer y al atardecer, el ratio difusa/directa es mayor que al mediodía. La presencia de nubes aumenta también la relación difusa/directa, y cuando el cielo está completamente nublado toda la radiación solar es difusa. Sin embargo, el máximo absoluto de radiación difusa se alcanza cuando la nubosidad es de alrededor del 50%.

La radiación global (R_s) durante días claros sigue una curva sinusoidal durante el día (Fig. 3.1), que puede ser medida por piranómetros o, para valores diarios, estimada a partir de la radiación extraterrestre (R_A) y la relación del número real (n_s) y el número máximo posible (N_s) de horas de sol:

$$R_s = \left(0.25 + 0.50\,\frac{n_s}{N_s}\right) R_A \tag{3.5}$$

Como alternativa, cuando no se dispone de datos sobre duración de la insolación podemos usar la ecuación de Hargreaves-Samani para calcular la radiación solar en función de la temperatura del aire y la radiación extraterrestre de la siguiente manera:

$$R_s = K_{RS} R_A \sqrt{T_{max} - T_{min}} \tag{3.6}$$

donde T_{max} y T_{min} son la temperatura máxima y mínima diaria del aire, respectivamente.

Por lo general, los valores de K_{RS} varían entre 0.16 y 0.19 $K^{-0.5}$ para las zonas interiores y costeras, respectivamente.

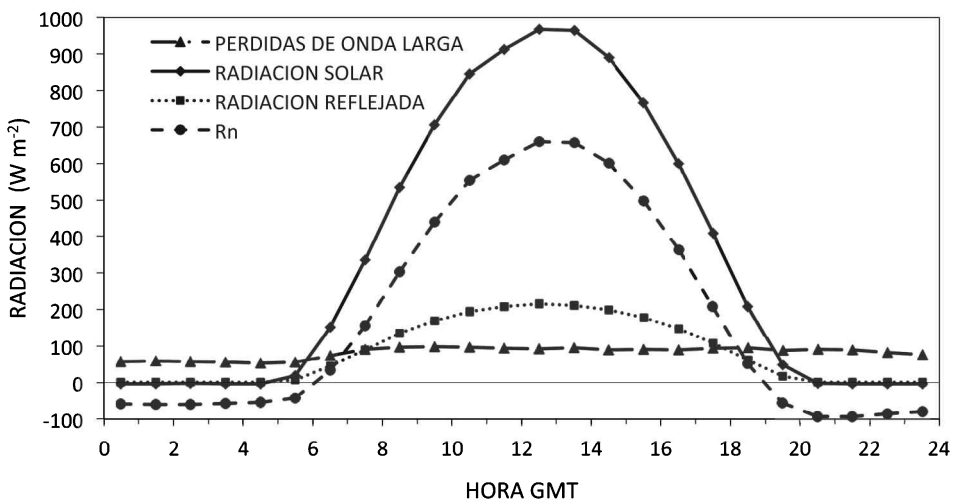


Figura 3.1. Variación a lo largo del día de la radiación solar, la radiación reflejada de onda corta, las pérdidas de onda larga y la radiación neta sobre un cultivo de algodón en Córdoba (España) el 27 de junio de 2003.

La radiación extraterrestre diaria (MJ/m²/ día) se puede calcular mediante la integración de la ley del coseno lo largo del día:

$$R_A = 37.4\, d_r \left[\operatorname{sen}\lambda_s \operatorname{sen}\delta_s h_s \frac{\pi}{180} + \cos\lambda_s \cos\delta_s \operatorname{sen} h_s\right] \tag{3.7}$$

donde h_s es la mitad de la duración del día (grados):

$$h_s = arc\cos[-\mathrm{tg}\,\lambda_s\,\mathrm{tg}\,\delta_s] \tag{3.8}$$

Además d_r es la corrección en función de los cambios en la distancia entre la Tierra y el Sol, que depende del día del año:

$$d_r = 1 + 0.033\cos\left[\frac{360\,DOY}{365}\right] \tag{3.9}$$

De la ecuación 3.7 podemos deducir la duración del día, es decir, el número máximo de horas de sol, como:

$$N_s = \frac{2\,h_s}{15} = \frac{1}{7.5}\,arc\cos[-\mathrm{tg}\,\lambda\,\mathrm{tg}\,\delta] \tag{3.10}$$

Por otra parte, la ecuación 3.5 indica que en días despejados la radiación solar es de alrededor del 75% de la radiación extraterrestre. En promedio, la radiación solar en días nublados es sólo el 25% de la radiación extraterrestre.

Ejemplo 3.3.

Vamos a calcular la duración del día y la radiación solar para día despejado, el 21 de diciembre en Grand Rapids, Michigan (42.9ºN) y South Hobart, Australia (42.9ºS).

La declinación solar y la corrección d_r dependen sólo del día del año:

Diciembre 21: DOY = 355

$$\delta_s = 23.45\cos\left[\frac{360\,(355-172)}{365}\right] = 23.45\cos(180) = -23.45^{\circ}$$

$$d_r = 1+0.033\cos\left[\frac{360\,355}{365}\right] = 1.033$$

Grand Rapids:

$$h_s = \text{arc}\cos[-\text{tg}42.9\ \text{tg}(-23.45)] = 66.23^{\circ}$$

Duración del día: $N_s = 2\,h_s/15 = 8.82$ horas

$$R_A = 37.4\,d_r\left[\text{sen}\lambda_s\,\text{sen}\delta_s h_s\,\frac{\pi}{180} + \cos\lambda_s\cos\delta_s\,\text{sen}h_s\right] = 11.66\ MJ\ m^{-2}\ día^{-1}$$

Día despejado: $R_s = 0.75\,R_A = 8.74$ MJ m^{-2} día^{-1}

South Hobart:

$$h_s = \text{arc}\cos[-\text{tg}(-42.9)\ \text{tg}(-23.45)] = 113.8^{\circ}$$

Duración del día: $N_s = 2\ h_s/15 = 15.17$ horas

$$R_A = 37.4\ d_r \left[\text{sen}\lambda_s\ \text{sen}\delta_s h_s \frac{\pi}{180} + \cos\lambda_s \cos\delta_s\ \text{sen}h_s \right] = 44.5\ MJ\ m^{-2}\ día^{-1}$$

Día despejado: $R_s = 0.75\ R_A = 33.4$ MJ m^{-2} día^{-1}

La variación de la radiación global a lo largo del año sigue también patrones sinusoidales, con una amplitud que depende de la latitud del lugar y su nubosidad. Por ejemplo, la Figura 3.2 muestra la curva anual de los valores medios de radiación solar en 2 sitios con muy alta y muy baja precipitación junto con la radiación solar máxima, calculada como el 75% de la radiación extraterrestre. Por otro lado, la Figura 3.3 muestra las curvas anuales de radiación solar para 3 lugares secos que difieren en latitud. A medida que nos alejamos del ecuador aumenta la amplitud de la curva anual de radiación.

La radiación solar media anual se encuentra por lo general entre 15 y 22 MJ m^{-2} día^{-1} para las latitudes entre 30º S y 30ºN y disminuye para las latitudes más altas (Fig. 3.4).

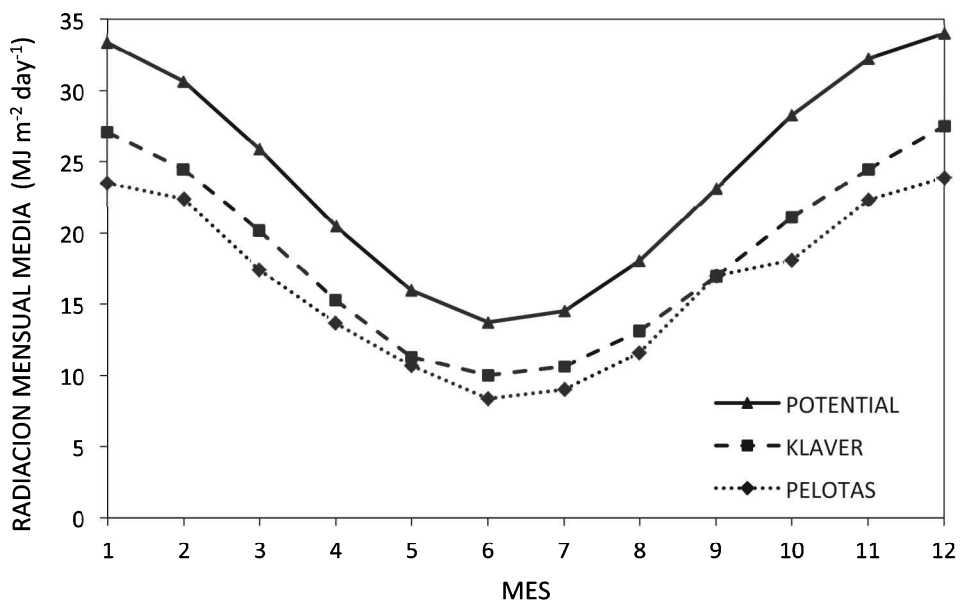


Figura 3.2. Variación de la radiación solar mensual media para dos localidades, Pelotas (Brasil) con una precipitación media anual de 1395 mm y Klawer (Sudáfrica) con una media de precipitación anual de 174 mm.

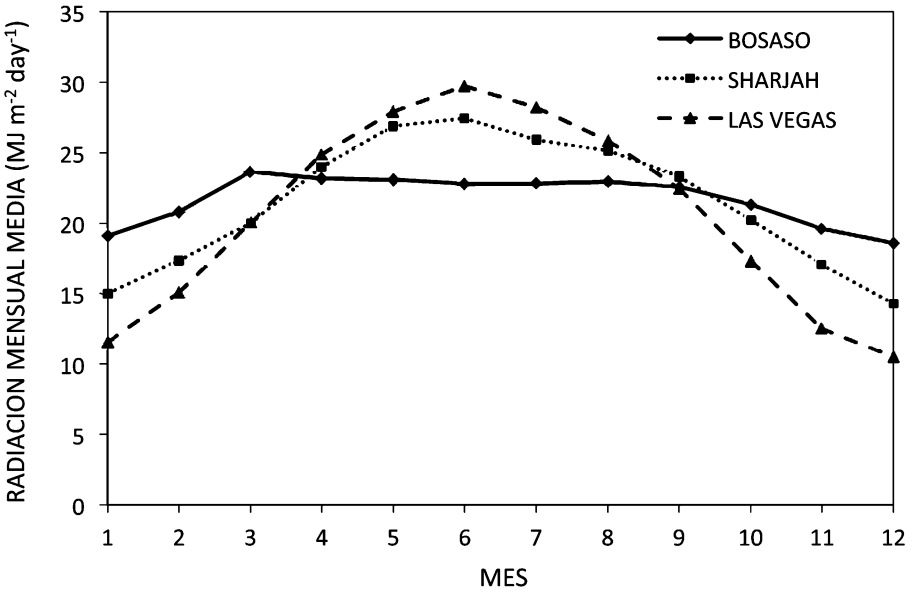


Figura 3.3. Variación de la radiación solar mensual media para tres lugares secos: Bosaso (Somalia) (11.28ºN), Sharjah (Emiratos Árabes Unidos) (25.33ºN) y Las Vegas (NV, EE.UU.) (36.08ºN).

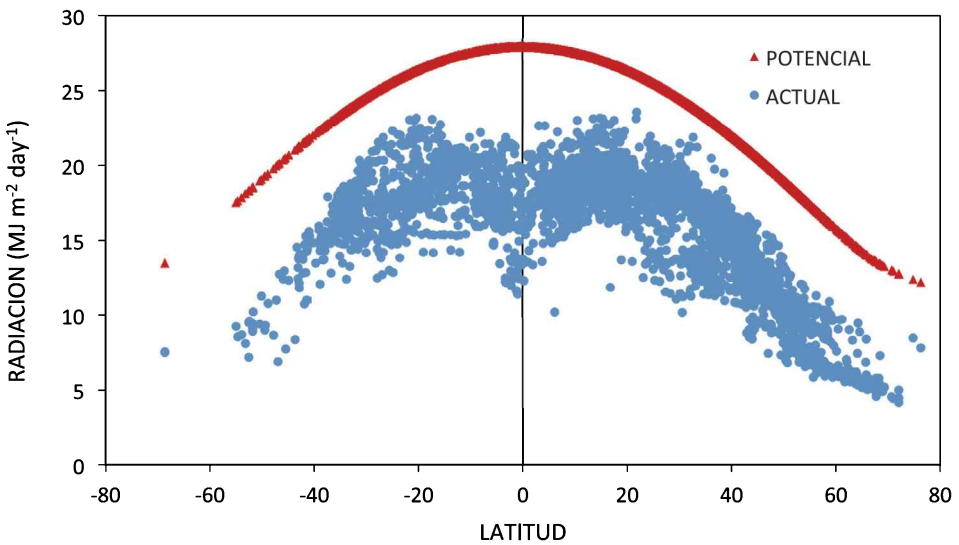


Figura 3.4. Radiación solar media anual para diferentes ubicaciones en función de la latitud.

Una vez que la radiación solar alcanza la superficie de la tierra, parte de la radiación se refleja. Usamos el término albedo (α) para expresar la relación entre radiación reflejada y radiación incidente en el intervalo de 0.3 a 3 micras. Algunos valores de albedo de distintas superficies naturales se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Albedo para radiación solar diaria de diferentes superficies.

Superficie	albedo
Nieve fresca	0.80-0.95
Arena seca	0.35
Suelo, húmedo, (oscuro cuando se seca)	0.08
Suelo, seco (oscuro cuando se seca)	0.13
Suelo, mojado (claro cuando se seca)	0.1
Suelo, seco (claro cuando se seca)	0.35
Masas de agua	0.05-0.14
Cultivos anuales	0.16-0.26
Frutales, bosques de hoja caduca	0.10-0.20
Bosques de coníferas	0.05-0.15

Por lo tanto, la radiación de onda corta que queda en la superficie de la tierra se puede calcular como $(1-\alpha)\ R_s$. Los valores de albedo de la vegetación se encuentran por lo general entre 0.15 y 0.20 para los bosques y entre 0.20 y 0.25 para cultivos anuales. El principal factor que determina el albedo de un suelo es su contenido de agua en superficie. Es fácil comprobar que un suelo seco se vuelve más oscuro después de ser humedecido. Por ejemplo el suelo del Centro de Investigación Agrícola de Córdoba (España) (textura media, bajo contenido de materia orgánica) tiene un albedo de 0.16 mojado y 0.23 cuando se seca.

3.4. RADIACIÓN DE ONDA LARGA

Todas las superficies son emisores de radiación de onda larga siguiendo la ley de Stefan-Boltzmann (Ec. 3.1). Bajo un cielo despejado, la mayor parte de la radiación emitida por la superficie de la Tierra (es decir, *la radiación terrestre)* es absorbida por las moléculas que componen la atmósfera, principalmente el vapor de agua y el dióxido de carbono, aunque el óxido nitroso (N_2O) y el metano (CH_4) también la absorben. La radiación en la banda de 8 a 12 micras (es decir, la *ventana atmosférica)* casi no es absorbida por estos gases debido al pequeño tamaño de sus moléculas. Bajo un cielo nublado, las gotas de agua de las nubes, contribuyen ampliamente a la absorción de la radiación de onda larga, por lo que se cierra la ventana atmos-

férica. El resto de radiación que no es absorbida se pierde en el espacio exterior. La radiación absorbida se re-emite a la superficie de la Tierra, lo que constituye *la radiación atmosférica.* Este flujo hacia abajo se origina principalmente a partir del primer kilómetro de la atmósfera, por las emisiones de estos componentes mencionados anteriormente, que son absorbentes altamente selectivos (por lo tanto emisores altamente selectivos) de radiación de onda larga. A efectos prácticos, como la temperatura media de la capa de aire en la atmósfera inferior está relacionada con la temperatura del aire cerca del suelo, aunque mucho más frío que este aire, es posible aplicar la ley de Stefan-Boltzmann con una emisividad aparente ajustada, que tiene en cuenta las diferencias entre la temperatura media de esta capa inferior de la atmósfera y la temperatura del aire cerca del suelo, la cobertura de nubes y el hecho de que la atmósfera inferior está lejos de ser un cuerpo negro. La radiación terrestre es casi siempre mayor que la radiación atmosférica, lo que resulta en una pérdida neta de radiación de onda larga.

Las pérdidas diarias de radiación de onda larga (R_b, MJ m^{-2} $día^{-1}$) se pueden calcular como:

$$R_b = \left(0.9\,\frac{n_s}{N_s} + 0.1\right)\left(0.34 - 0.14\,\sqrt{e_a}\right) 4.9\;10^{-9} T^4 \tag{3.11}$$

donde 4.9 10^{-9} es la constante de Stefan-Boltzmann expresada en MJ m^{-2} K^{-4}, e_a es la presión de vapor del aire (kPa), T es la temperatura del aire (K) y n_s/N_s es la relación entre duración real de la insolación (n_s) y la duración del día (N_s).

La ecuación 3.11 indica que las pérdidas de onda larga serán más altas bajo un cielo despejado (alta n_s/N_s), con baja humedad y con alta temperatura del aire. La nubosidad tiene un enorme impacto en las pérdidas de radiación de onda larga, para una temperatura y humedad del aire dadas, de modo que las pérdidas de onda larga bajo un cielo nublado son sólo el 10% de las que ocurren cuando el cielo está despejado.

3.5. LA RADIACIÓN NETA

El saldo neto de la radiación que permanece sobre una superficie de albedo α se expresa por la ecuación:

$$R_n = (1-\alpha)\,R_s - R_b \tag{3.13}$$

La radiación neta es, pues, la diferencia entre el flujo de la radiación hacia la superficie y desde la superficie de la Tierra. Es por lo tanto la energía disponible en la superficie para la evaporación, el calentamiento del aire, el suelo y el cultivo y, en menor medida, para la fotosíntesis.

Ejemplo 3.3.

Vamos a calcular la radiación neta sobre una pradera (α = 0.23) en South Hobart (42.9ºS) de un día despejado el 21 de diciembre si la temperatura media del aire es 25ºC y la presión de vapor del aire es 1.8 kPa. La radiación solar ya se ha calculado en el ejemplo 3.3.

Pérdidas de onda larga:

$$R_b = \left(0.9\,\frac{15.17}{15.17} + 0.1\right)\left(0.34 - 0.14\sqrt{1.8}\right) 4.9\,10^{-9}(273+25)^4 = 5.88\ MJ\ m^{-2}\text{día}^{-1}$$

Radiación neta:

$$R_n = (1 - 0.23)\ 33.4 - 5.88 = 19.8\ \text{MJ m}^{-2}\ \text{día}^{-1}$$

La Figura 3.1 muestra la variación a lo largo del día de la radiación solar, la radiación neta y la radiación solar reflejada en un día de verano en un campo de algodón en Córdoba, España. Las curvas de R_s y R_n tienen forma similar, pero mientras que el flujo de radiación solar es siempre positivo durante el día y durante la noche es cero, la radiación neta es negativa por la noche.

Los valores diarios de radiación neta en verano suelen ser positivos y se van reduciendo mucho conforme las noches se hacen más largas en el otoño. En latitudes más altas la radiación neta diaria alcanza valores negativos durante el invierno. En Córdoba, por ejemplo, los valores de radiación solar y neta son máximos en julio, aunque el máximo de radiación extraterrestre ocurre en junio. Esto se explica por la mayor nubosidad media de junio en comparación con el mes de julio.

3.6. RADIACIÓN INTERCEPTADA

El área foliar es un buen indicador de la capacidad del cultivo para interceptar la radiación. Para caracterizar el área foliar de un cultivo se utiliza el índice de área foliar (LAI), que se define como la relación entre el área total de hojas verdes (una cara) y la superficie del terreno.

Según Monsi y Saeki la radiación transmitida a través de un cultivo es una función exponencial de LAI:

$$I = I_0 e^{-k\,LAI} \tag{3.14}$$

donde I_0 y I son las densidades de flujo por encima y por debajo de la cubierta, respectivamente, y k es el coeficiente de extinción.

La radiación interceptada será la diferencia entre la radiación incidente y la que llega a la superficie del suelo. Por lo tanto:

$$I_0 - I = I_0(1 - e^{-k\,LAI}) \tag{3.15}$$

Las ecuaciones anteriores pueden ser aplicadas a cualquier tipo de radiación en términos de longitud de onda (por ejemplo, PAR o infrarrojo cercano, NIR), propiedades direccionales (directa o difusa) o escalas temporales (instantánea o diaria) tomando el coeficiente de extinción apropiado.

El coeficiente de extinción depende del ángulo de elevación del sol y de la distribución de ángulos foliares. El modelo simple más útil de distribución de ángulos foliares es la distribución elipsoidal de Campbell. Para los cálculos diarios, el coeficiente de extinción es un parámetro que puede ser fijado para todo el ciclo de cultivo o para las fases fenológicas específicas. Algunos ejemplos de estos parámetros se dan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Coeficientes de extinción diario (k) de PAR y parámetro X de la distribución elipsoidal de ángulos foliares para distintos cultivos. Fuentes: (1) Campbell y Norman, 1998. (2) Hough, 1990. Eur. Commission Report EUR 13039 EN. (3) Jeuffroy y Ney.1997. Field Crop Res. 53:3–16. (4) Kanton y Dennett. 2008. West Afric. J. Appli. Ecol.13:55-66. (5) Squire 1990. The Physiology of Tropical Crop Production. CAB Int. (6) van Heemst, 1988. Simulation Report CABO-TT 17, Wageningen. (7) Vieira et al. 2009. Sci. Horticul.121:404-409.

Cultivo	k (PAR)	parámetro X	Fuente
Habas, guisantes	0.4-0.5		2, 3
Pimiento	0.72	2.5-2.9	7
Yuca, cacahuete, algodón	0.80-0.87		5, 6
Forrajes y pastos (leguminosas)	0.8-0.9	1.5-3.3	3
Maíz, sorgo, mijo	0.57-0.70	1.40	1, 4, 5, 6
Palma de aceite	0.48		5
Colza	0.84	1.9-2.1	1, 2, 6
Patata	0.64	1.7-2.5	1,6
Soja, garbanzo	0.7-0.8		3, 5, 6
Remolacha, pimiento (campana)	0.68	1.5-1.9	1, 2, 6
Caña de azúcar	0.46		6
Girasol	0.90	1.8-4.1	1,6
Batata	0.60		6
Trigo, cebada, arroz	0.44-0.52	1-1.2	1, 2, 6

El coeficiente de extinción se relaciona con el ángulo de inclinación foliar como se muestra en la Fig. 3.5. Las hojas verticales (parámetro de inclinación de la hoja X= 0) tienen coeficientes de extinción alrededor de 0.4 mientras que para las hojas horizontales se acercan a 1.

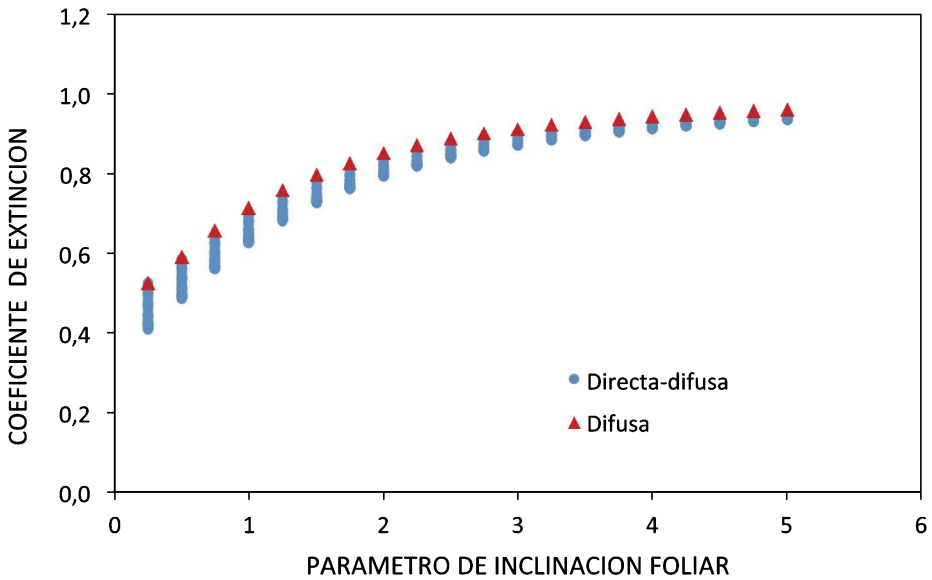


Figura 3.5. Coeficientes de extinción para radiación solar diaria utilizando el modelo elipsoidal de Campbell.

La distribución de ángulos foliares tiene implicaciones agronómicas y ecológicas. Las plantas pequeñas con distribución horizontal (es decir, valores más altos de *k)* resultan en un mayor intercepción de radiación que las que tienen hojas más erectas. El inconveniente es que cuando el LAI es alto, la distribución de la luz es muy desigual, las hojas inferiores reciben muy poca luz, lo que por lo general acelera su senescencia. Por el contrario, la distribución angular más vertical (es decir, k bajo) puede ser ventajosa para interceptar la radiación cuando el ángulo cenital es grande (invierno o latitudes altas) y conduce a una distribución más homogénea de la radiación dentro de la cubierta cuando el LAI es alto. Por lo tanto el máximo LAI que puede ser mantenido por un cultivo será mayor para coeficientes de extinción bajos. Idealmente, para una intercepción de radiación óptima, las hojas superiores deberían ser más erguidas y las inferiores más horizontales. De hecho, las cubiertas de cultivares modernos de maíz tienen dicha distribución de ángulos foliares.

La fotosíntesis a escala de hoja se satura con alta radiación (Capítulo 13), pero la radiación disminuye a medida que nos movemos hacia abajo en la cubierta, por lo que una gran parte de las hojas estará por debajo del nivel de saturación. Esto resulta en que la asimilación del cultivo crece linealmente con la radiación a nivel del dosel, como se muestra en el Capítulo 13.

Cuando el área foliar no se puede determinar, la fracción de radiación interceptada puede ser estimada mediante el cálculo de la fracción de la superficie del suelo cubierta por el cultivo (proyección horizontal). Esto se puede evaluar fácilmente en el campo utilizando fotografías y el software adecuado y se expresa como un por-

centaje de cobertura completa (100%). La cobertura del suelo es un parámetro útil para la caracterización del tamaño de la cubierta mediante teledetección.

3.7. INTERCEPTACIÓN DE RADIACIÓN DE ÁRBOLES

Consideramos la copa del árbol como un esferoide con una densidad de área foliar (μ_l, $m^2\ m^{-3}$), radio horizontal *r* y altura h_t.

Para cualquier árbol aislado la interceptación de radiación de rayos con ángulo cenital θ es el producto del flujo de radiación incidente en la dirección de los rayos (I_p), el área proyectada de la copa en la dirección θ *(PEA (θ))* y la interceptación media para PEA:

$$I_i = I_p\, PEA(\theta)[1 - t_c(\theta)] \tag{3.16}$$

donde $t_c(\theta)$ es la transmisividad media de la copa en la dirección de los rayos del sol.

Para un esferoide:

$$PEA(\theta) = \pi r^2 \sqrt{cos^2(\theta) + \left(\frac{h_t}{2\,r}\right)^2 cos^2(\theta)} \tag{3.17}$$

Nótese que PEA se relaciona con el área de sombra proyectada por la copa (S_s) sobre el plano horizontal ($PEA=S_s \cos(\theta)$). La transmisividad media del esferoide puede ser calculada como:

$$t_c(\theta) = 2\,\frac{1 - (1 + A)e^{-A}}{A^2} \tag{3.18}$$

donde

$$A = G(\theta)\frac{3}{2}\frac{\mu_l\, V}{PEA(\theta)} \tag{3.19}$$

donde *G(θ)* es la función de proyección en la dirección θ y V es el volumen del árbol (m^3). Se pueden deducir ecuaciones similares para otros sólidos de revolución como los semiesferoides.

La interceptación diaria de radiación de árboles aislados se puede calcular usando la interceptación para un ángulo cenital de 1 radián. Para esferoides y semiesferoides, de altura h y horizontal radio r, la relación de radiación interceptada, es decir, la proporción de radiación interceptada por el árbol y la radiación incidente sobre una superficie horizontal puede calcularse como:

$$RR_i = 0.95\,(1 - t_{c1})\,PEA_1\left[1 - \alpha' + \alpha'\frac{0.0036\,R_{sn}N_s}{0.75\,R_A}\right] \tag{3.20}$$

donde R_{sn} (W m^{-2}) es la radiación solar media normal a los rayos de sol para condiciones de cielo despejado, que se puede calcular como:

$$R_{sn} = -0013\,x^2 + 2.19\,x - 79.7 \tag{3.21}$$

siendo x=0.75 10^6 R_A/(3600 N_s). La ecuación 3.20 puede simplificarse:

$$RR_i = c_1 PEA_1\left[1 - \alpha' + \alpha'\left(1.84 - \frac{0.75\,R_A}{3.6\,N_s}\right)\right] \tag{3.22}$$

N_s es la duración del día (horas) mientras que R_A es la radiación extraterrestre diaria (MJ m^{-2} day^{-1}). El factor α′ refleja las condiciones del cielo, siendo 0 para cielos completamente nublados y 1 para cielo despejado, y puede ser calculado usando la radiación medida:

$$\alpha' = 2\,\frac{R_s}{R_A} - 0.5 \tag{3.23}$$

Los factores relacionados con los árboles son, en primer lugar, la superficie de copa proyectada para 1 radián:

$$PEA_1 = \pi\,r^2\left(a_p + b_p\,{}^{h}/_{r}\right) \tag{3.24}$$

La interceptación media de la copa para 1 radián es:

$$1 - t_{c1} = 1 - exp\left[-c_p A + d_p A^2\right] \tag{3.25}$$

donde

$$A = \frac{\mu\,\pi\,r^3 h}{2\,PEA_1} \tag{3.26}$$

Los coeficientes de las ecuaciones 3.24 y 3.25 dependen de la forma de la copa:

Para esferoides: a_p=0.3, b_p=0.35, c_p=0.64, d_p=0.026

Para semiesferoides: a_p=0.36, b_p=0.4, c_p=0.646, d_p=0.047

Las ecuaciones que se presentan aquí requieren conocer la densidad de área foliar, es decir, el cociente entre área foliar y volumen de copa. Podemos tomar valores tan bajos como 0.5 m^2m^{-3} para copas muy poco densas hasta 2-3 para copas densas.

Ejemplo 3.3.

Tenemos un olivar en Córdoba, España, con un marco de 7 x 3.5 m. Los árboles tienen radio horizontal 0.5 m, altura 1.5 m y densidad de área foliar 2 m^2 m^{-3}. Vamos a calcular la radiación interceptada el 21 de marzo, bajo condiciones de cielo despejado para ese día y ubicación: R_A=29.8 MJ m^{-2} $día^{-1}$ y N=12 h.

Usando las ecuaciones 3.24, 3.25 y 3.22:

Suponiendo un esferoide:

PEA_1 = 1.06 m^2 y c_1=0.49, por lo que RR_i=0.69 m^2 y el PAR interceptado es 7 MJ $día^{-1}$.

Asumiendo un semiesferoide:

PEA_1 = 1.23 m^2 y c_1=0.44, por lo que RR_i=0.71 m^2 y el PAR interceptado es 7.2 MJ $día^{-1}$.

Si queremos calcular la radiación interceptada a escala de plantación para calcular la fracción de radiación interceptada dividimos RR_i por el área ocupada por cada árbol (7 x 3.5 = 24.5 m^2):

f_{PI} = 0.69/24.5 = 0.03

Este mismo olivar tendría RR_i=0.79 m^2 el 1 de enero y 0.65 m^2 el 21 de Junio. Esto ilustra el hecho de que los árboles aislados interceptan una mayor fracción de radiación en invierno que en verano.

Al igual que con los cultivos herbáceos, la radiación interceptada por un árbol se puede estimar mediante la fracción de suelo cubierto, como la superficie de sombra al mediodía solar dividida por el área que corresponde a cada árbol. Dada la posible complejidad de la arquitectura de los árboles, esto es sólo una primera aproximación al cálculo de la radiación interceptada según la metodología indicada anteriormente.

BIBLIOGRAFÍA

Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M(1998) Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome.

Campbell GS, Norman JM (1998) An introduction to environmental biophysics. Springer.

Monteith J, Unsworth M (2013) Principles of Environmental Physics: Plants, Animals, and the Atmosphere. Academic Press.

Rosenberg NJ, Blad BL,Verma SB (1983) Microclimate: The Biological Environment. John Wiley and Sons.

Capítulo 4

El viento y el transporte turbulento

F.J. VILLALOBOS
E. FERERES
L. TESTI

RESUMEN:

El flujo de viento sobre una cubierta vegetal provoca una transferencia de momento desde el aire a la cubierta que genera turbulencia que, a su vez, mejora el intercambio de materia y energía entre la atmósfera y el cultivo. La turbulencia aumenta con la velocidad del viento y la rugosidad aerodinámica, que es proporcional a la altura del cultivo. La velocidad del viento varía de forma logarítmica con la altura. Este perfil se puede describir matemáticamente por dos parámetros que están relacionados con la altura del cultivo. La turbulencia también puede ser expresada como una función inversa de la resistencia aerodinámica, que es indicativa de la dificultad para el transporte turbulento y es por lo tanto muy alta cuando U es baja y para los cultivos poco rugosos (bajos). En el interior del dosel la velocidad del viento adquiere perfiles más dependientes de la arquitectura de la cubierta que del vector viento que fluye sobre ella. La velocidad del viento cambia considerablemente temporal y espacialmente, siendo generalmente baja por la noche y máxima después de mediodía; en el largo plazo, las velocidades del viento promedio más altas a menudo se registran en las latitudes altas.

4.1. EL TRANSPORTE DE MASA Y ENERGÍA DESDE EL CULTIVO

La radiación neta sobre una superficie de cultivo se consume en distintos procesos. Parte se gasta en convección, lo que aumenta la temperatura del aire dentro y por encima del cultivo (calor sensible). El resto se gasta en conducción que lleva a un aumento de la temperatura del suelo (y el cultivo), o en calor latente como resultado de la evaporación. Una pequeña fracción de la energía también se gasta en la reducción de CO_2 (fotosíntesis).

La transferencia de masa (por ejemplo, vapor de agua) o energía (calor sensible) se expresa generalmente por la analogía de la ley de Ohm:

Flujo = $(C_s-C_a)/r$

donde C_s y C_a son las concentraciones de materia o niveles de energía en la parte superior del dosel y en la atmósfera, respectivamente, y r es la resistencia al intercambio. Esta resistencia puede referirse a diferentes procesos (por ejemplo, conducción, convección, etc.). En el caso del transporte de calor por convección que es muy similar a la transferencia de compuestos entre el cultivo y la atmósfera, los flujos se ven favorecidos por la turbulencia, que a su vez depende de la velocidad del viento.

4.2. EL VIENTO Y EL INTERCAMBIO DE MATERIA, ENERGÍA Y CANTIDAD DE MOVIMIENTO

Los cultivos son sometidos a la acción mecánica del viento, que mueve y dobla sus hojas, tallos y ramas. Pero el viento tiene otro efecto esencial en los cultivos, ya que mejora el transporte turbulento de vapor de agua, CO_2 y calor. Este flujo se caracteriza por corrientes de aire turbulentos o remolinos de tamaños diferentes y dirección variable y es muy eficaz como mecanismo de transporte. Si el calor y los gases se transportaran mediante un mecanismo de difusión pura, las condiciones en la superficie de la Tierra no serían adecuadas para la vida vegetal debido a las altas temperaturas que se alcanzarían y a la limitación de la velocidad de flujo descendente de CO_2 requerido para la fotosíntesis.

La velocidad del viento es determinada por el transporte de la turbulencia en la capa límite superficial, es decir, la capa de la atmósfera más cerca al cultivo y el suelo. Si el aire fluye en paralelo a una superficie plana, el perfil de la velocidad del viento es logarítmico (aumento exponencial con la altura) y la velocidad tiende a cero a medida que nos acercamos a la superficie. Esta tendencia se debe a la fuerza de fricción entre la superficie y el aire, que se transmite a las capas superiores de aire a través de las capas intermedias. La fuerza de fricción por unidad de área se llama tensión de corte (τ_s) y es proporcional al gradiente de velocidad del viento:

$$\tau_s = \mu_a \frac{dU}{dz} \tag{4.1}$$

donde μ_a es la viscosidad dinámica del aire, U es la velocidad del viento y *z* es la altura. Las dimensiones de τ_s son las mismas que las de momento por unidad de superficie y unidad de tiempo (flujo de momento). Esta variable permite una analogía entre el transporte de calor (o masa) y la transferencia vertical de momento. La magnitud del flujo de momento es indicativa de la cantidad de torbellinos que se forman y, por lo tanto, de la eficacia de la turbulenta en el intercambio de vapor de agua, calor, CO_2 y otras partículas, entre el cultivo y la atmósfera.

4.3. PERFILES DE VELOCIDAD DEL VIENTO POR ENCIMA DEL CULTIVO

Las superficies perfectamente planas son muy raras en la naturaleza, especialmente en tierra. Cuando hay obstáculos presentes (por ejemplo, piedras, agregados del suelo, cubiertas vegetales) el perfil del viento se ve afectado. Los obstáculos impiden el movimiento del aire en comparación con una superficie plana ideal. En primer lugar, la velocidad del viento no es cero en la superficie como se muestra en la Fig. 4.1, sino en un nivel intermedio entre la superficie y la altura de los obstáculos. Esta altura se llama *desplazamiento del plano cero* (d_z) e indica el nivel por encima del cual se absorbe el momento, es decir, el nivel virtual donde se ejercen las fuerzas de fricción sobre el cultivo.

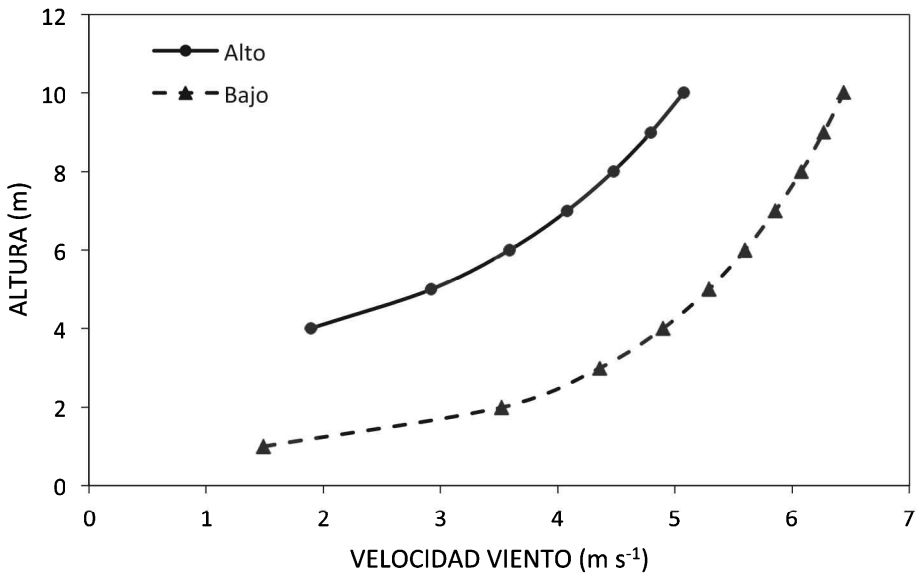


Figura 4.1. Perfiles de viento sobre un cultivo bajo (1.0 m de altura) y uno muy alto (altura 4.0 m).

Otra característica que influye en la aerodinámica de una superficie es la *longitud de la rugosidad* (z_0). Este es un parámetro utilizado para cuantificar la distorsión

del perfil de viento real sobre una superficie rugosa respecto del perfil logarítmico ideal si la superficie fuera lisa; es por lo tanto una medida de la rugosidad aerodinámica de la superficie. Al igual que el desplazamiento del plano cero, z_0 también tiene dimensiones de longitud y su valor oscila entre 10^{-6} m para una superficie helada lisa hasta 0.3 m para plantaciones frutales, llegando a 1 m para algunos bosques. Los dos parámetros (d_z y z_0) están relacionados con la forma de la cubierta. Obviamente, z_0 depende de la rugosidad del cultivo (uniformidad de altura entre plantas, distancia entre plantas o entre filas, porcentaje de cobertura, etc.). El parámetro d_z también depende de la altura y la flexibilidad de las plantas, de la densidad de follaje, etc. Una aproximación simple para los valores de los dos parámetros para diferentes cultivos es calcular d_z como 0.65 h y z_0 como 0.13 h, donde h es la altura del cultivo.

En la Fig. 4.1 se muestran perfiles típicos de velocidad horizontal del viento sobre cultivos. Estos perfiles pueden ser calculados para condiciones neutras (véase el Capítulo 5) como:

$$U(z) = \frac{u_*}{k_k} \ln\left(\frac{z - d_z}{z_0}\right) \tag{4.2}$$

donde U(z) es la velocidad media del viento a la altura z, k_k es la constante de von Kármán (alrededor de 0.4), u_* es la velocidad de fricción, z_0 es la longitud de la rugosidad y d_z es el desplazamiento del plano cero.

La velocidad de fricción (llamada así por tener las dimensiones de velocidad, m/s) se relaciona con el flujo de momento por:

$$\tau_s = \rho_a u_*^2 \tag{4.3}$$

donde ρ_a es la densidad del aire (kg m^{-3}) que depende de la temperatura del aire (T, expresada en K) y la presión atmosférica (P_{at} en kPa) (el efecto de la humedad del aire se desprecia en este caso):

$$\rho_a = 3.484 \frac{P_{at}}{T} \tag{4.4}$$

Mediante la aplicación de las ecuaciones anteriores, una vez que se conocen z_0 y d_z podemos generar todo el perfil de la velocidad del viento en función de la misma medida a una altura de referencia (z_m):

$$U(z) = U(z_m) \frac{[\ln(z_m - d_z) - \ln z_0]}{[\ln(z - d_z) - \ln z_0]} \tag{4.5}$$

Ejemplo 4.1.

Consideremos los perfiles de viento de dos cultivos con una altura de 0.10 m (por ejemplo, una pradera) y 2.0 m (por ejemplo maíz), respectivamente. Se asume que la velocidad del viento a 100 m de altura es de 10 m/s en ambos casos. La velocidad del viento por encima de maíz es significativamente menor que por encima de la pradera, es decir, el maíz frena más el viento, o, en otras palabras, le roba una mayor cantidad de movimiento al viento. Las velocidades de fricción son 0.45 m/s y 0.67 m/s, para la pradera y el maíz, respectivamente, que corresponden a valores de transferencia de momento de 0.26 y 0.59 N/m^2.

A menudo, la única información disponible sobre la velocidad del viento proviene de una estación meteorológica cercana donde se mide el viento a una altura estándar (z = 2 m en estaciones agrometeorológicas). Sin embargo, a menudo necesitamos saber U a una altura z sobre un cultivo de altura h. Podemos utilizar la ecuación 4.5 para calcular primero U_{100}, la velocidad a una altura de 100 m, que se puede suponer que no varía espacialmente, es decir, es la misma por encima de la estación meteorológica y sobre el cultivo. Si la estación está situada sobre hierba (h = 0.12 m) podemos deducir:

$$U_{100} = U_{2g} \frac{[\ln(100 - 0.078) - \ln(0.0156)]}{[\ln(2 - 0.078) - \ln(0.0156)]} = 1.82\, U_{2g} \tag{4.6}$$

donde U_{2g} es la velocidad del viento medida a 2 m sobre la hierba.

Y entonces podemos calcular U(z) por encima de nuestro cultivo de altura h:

$$U(z) = 1.82\, U_{2g} \frac{[\ln(z - 0.65\, h) - \ln(0.13\, h)]}{[\ln(100 - 0.65\, h) - \ln(0.13\, h)]} \tag{4.7}$$

Ejemplo 4.1.

La velocidad del viento para z = 2 m por encima de una pradera (U_{2g}) es de 2.5 m/s. Vamos a calcular U para z = 5 m, sobre un cultivo de maíz de 2 m.

$$U(z) = 1.82 \cdot 2.5 \frac{[\ln(5 - 0.65 \cdot 2) - \ln(0.13 \cdot 2)]}{[\ln(100 - 0.65 \cdot 2) - \ln(0.13 \cdot 2)]} = 2.03\, m/s$$

4.4. RESISTENCIA AERODINÁMICA

La ecuación que describe el flujo de cantidad de movimiento en términos de la pendiente de la velocidad del viento horizontal (Ec. 4.1), se puede escribir usando la

analogía de la Ley de Ohm, mediante la introducción de una resistencia aerodinámica a la transferencia de momento entre las alturas z_1 y z_2. Por lo tanto, si:

$$\tau_s = \rho_a \frac{U_2 - U_1}{r_{aM}} \tag{4.8}$$

y usando las ecuaciones 4.2 y 4.3, entonces la resistencia aerodinámica entre una altura z, donde la velocidad del viento es U (z) y la altura $d+z_0$ (donde la velocidad extrapolada del viento es cero), será:

$$r_{aM} = \frac{\left[\ln\left(\frac{z-d_z}{z_0}\right)\right]^2}{{k_k}^2 U(z)} = \frac{U(z)}{{u_*}^2} \tag{4.9}$$

Esta ecuación indica que la resistencia aerodinámica al flujo de momento será mayor para cultivos bajos que para cultivos altos. De hecho las cubiertas bajas y lisas son menos eficientes en la ralentización del viento que fluye por encima de ellas, y por tanto, menos energía se transfiere desde el viento a la superficie para una velocidad de viento dada. La resistencia disminuye a medida que aumenta la velocidad del viento. En teoría, la resistencia tiende a infinito cuando U tiende a 0. Sin embargo, esto no ocurre en la atmósfera durante el período diurno a causa de generación de inestabilidad térmica que será tratada más adelante en el Capítulo 5. Baste con observar aquí que cuando U disminuye, la falta de turbulencia reduce el intercambio de calor entre el cultivo y el ambiente aumentando de este modo la temperatura de la cubierta y del aire en contacto con el mismo. Este aire caliente tiende a elevarse debido a su densidad más baja, lo que causa turbulencia. Este tipo de turbulencia se denomina "térmica", en contraposición a la turbulencia "mecánica", que es debido a la fricción del viento sobre el cultivo. Ambos tipos de turbulencia coexisten aunque la turbulencia mecánica prevalece cuando U es alta y la turbulencia térmica es mayor durante el día, cuando U es baja.

Ejemplo 4.1.

Vamos a calcular la resistencia aerodinámica para z = 5 m en los dos casos mencionados en el Ejemplo 4.1 (maíz con h=2 m y pradera con h = 0.12 m) si la velocidad del viento a 2 m de altura sobre hierba (U_{2g}) es de 2.5 m/s.

Tenemos que calcular en primer lugar U(z) para z=5 m en ambos casos. Vimos en el ejemplo 4.2 que U(z=5) = 2.03 m/s para el maíz.

Para la pradera, utilizando la ecuación 4.5:

$$U(z=5) = U_{2g} \frac{[\ln(5-0.078) - \ln(0.0156)]}{[\ln(2-0.078) - \ln(0.0156)]} = 1.195\, U_{2g} = 2.99\, m/s$$

A continuación, aplicando la ecuación 4.9 para las dos superficies:

Maíz:

$$r_{aM} = \frac{\left[\ln\left(\frac{5 - 0{,}65 \cdot 2}{0{,}13 \cdot 2}\right)\right]^2}{0{,}4^2 \cdot 2.03} = 21{,}7 \text{ s/m}$$

Pradera:

$$r_{aM} = \frac{\left[\ln\left(\frac{5 - 0{,}65 \cdot 0{,}12}{0{,}13 \cdot 0{,}12}\right)\right]^2}{0{,}4^2 \cdot 2{,}99} = 69{,}2 \text{ s/m}$$

4.5. LA VELOCIDAD DEL VIENTO Y LA TURBULENCIA A LA ALTURA DE LA CUBIERTA

El análisis matemático de perfiles de viento por encima de los cultivos presentado anteriormente debe permitir el cálculo de la velocidad del viento a la altura de la cubierta en función de la altura del cultivo. Sin embargo, la existencia de la denominada sub-capa rugosa que se extiende hasta 2-2.5 veces la altura del dosel no se ha tenido en cuenta. En esta capa los perfiles de temperatura y de viento están distorsionados debido a la proximidad de la vegetación. Incluyendo este efecto, la siguiente ecuación permite calcular la velocidad del viento a la altura del dosel como una función de la velocidad del viento medida a 2 m de altura sobre pradera:

$$U_h = \frac{2.6\, U_{2g}}{6.6 - \ln(h)} \tag{4.10}$$

Esta ecuación indica que para la mayoría de los cultivos agrícolas, con una altura entre 0.2 y 3 m, la velocidad del viento a la altura del dosel oscila entre 0.32-0.46 veces la velocidad del viento a 2 m sobre hierba.

En las secciones anteriores hemos definido la turbulencia como un conjunto de torbellinos de diferente tamaño y propiedades (temperatura, humedad, concentración de CO_2) que se mueve hacia arriba o hacia abajo y siguen, por término medio, la dirección horizontal del viento. Este intercambio vertical de torbellinos es responsable de los flujos entre el cultivo y la atmósfera. Por ejemplo, el transporte convectivo de calor es debido a los torbellinos calientes que se mueven hacia arriba y a los torbellinos más fríos que se mueven hacia abajo. Podemos caracterizar este intercambio turbulento utilizando la velocidad media de los torbellinos que suben, que es igual a la velocidad media de los que descienden (ya que la velocidad vertical media es siempre próxima a cero). Esta velocidad ascendente, acompañada de una velocidad descendente de la misma magnitud, puede ser vista como una tasa de renovación

media del aire que se encuentra por debajo, y la llamamos w_r. La tasa de renovación es proporcional a la velocidad horizontal del viento (U). Para condiciones neutras podemos escribir:

$$w_r = 0.14\, U \tag{4.11}$$

Debe tenerse en cuenta que w_r tiene dimensiones de velocidad. Mediante la combinación de las ecuaciones 4.10 y 4.11 se puede calcular la tasa de renovación del aire en contacto con un dosel de altura h:

$$w_r = 0.14\ \frac{2.6\, U_{2g}}{6.6 - \ln(h)} \tag{4.12}$$

Y la tasa de renovación relativa con dimensiones de inverso de tiempo (T^{-1}) se obtendría dividiendo w_r por h.

Ejemplo 4.1.

Cuando la velocidad del viento sobre la pradera es de 2 m/s, la tasa de renovación de un cultivo de maíz con una altura de 2 m es:

$$w_r = 0.14\ \frac{2.6\ x\ 2}{6.6 - \ln(2)} = 0.123 \frac{m}{s}$$

Y la tasa de renovación relativa es 0.123/2 = 0.0615 s^{-1}

Esto significa que el aire en contacto con el dosel sería completamente renovado en 16.3 s (inversa de la tasa de renovación relativa). Un concepto similar a la tasa de renovación se aplica a invernaderos como una medida de la ventilación, y generalmente se expresa en número de renovaciones por hora. En el ejemplo anterior, la tasa de renovación relativa es equivalente a 0.0615 s^{-1} x 3600 s/hora = 221.4 $hora^{-1}$

4.6. LA VELOCIDAD DEL VIENTO DENTRO DE LOS CULTIVOS

Si los perfiles de viento son complejos por encima del dosel, son aún más complicados en su interior. En términos simples, la altura de la copa se divide en dos o tres zonas. La capa superior (por encima de d_z) absorbe la mayor parte de la cantidad de movimiento. En esta capa la velocidad del viento disminuye logarítmicamente al entrar en el dosel y tiene la misma dirección que el viento medio sobre el dosel. Esto se ve claramente en la Fig. 4.2 para un olivar en seto hasta 2.5 m de altura. Por debajo de esta altura, la velocidad del viento es baja y casi constante (35 a 40% del valor en la parte superior de la cubierta, en el ejemplo de la Fig. 4.2).

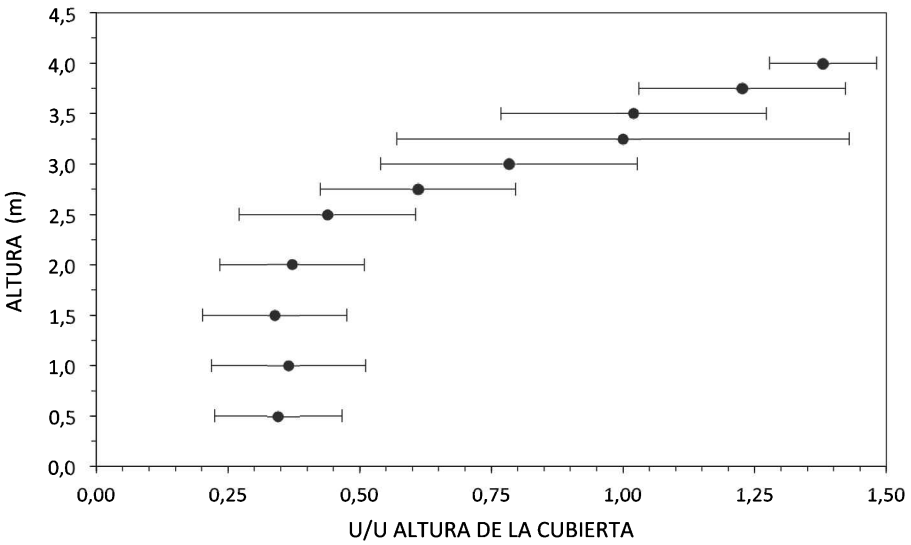


Figura 4.2. Perfil de velocidad del viento (en relación al medido a la altura del dosel, 3.25 m) medido en un olivar cerca de Córdoba (España) en el verano de 2012. Los segmentos horizontales representan el doble de la desviación estándar.

4.7. VARIACIÓN ESTACIONAL Y DIARIA DE LA VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DEL VIENTO

Tanto la evolución temporal diaria como estacional de la velocidad del viento son muy variables. Los vientos predominantes tradicionalmente se han caracterizado por la rosa de los vientos, que es una representación de las frecuencias de ocurrencia de cada dirección del viento. La variación estacional, además de ser muy variable de un año a otro, a menudo es específica del sitio. A modo de ejemplo, la Figura 4.3 muestra la velocidad del viento en Fuente Palmera (España) durante el año. En este caso, los valores más altos de U se producen en primavera y verano y los valores más bajos se producen en otoño e invierno. Las grandes diferencias entre localidades en los patrones de viento son evidentes en la Figura 4.4, que muestra los valores medios mensuales de U en Bangui (República Centroafricana), Córdoba (España) y Amarillo (Texas). La gran variación entre ubicaciones en la velocidad del viento se ilustra en la Fig. 4.5 que muestra la velocidad media anual del viento para muchas localidades en función de la latitud. La velocidad media del viento y su variabilidad entre zonas aumenta a medida que nos alejamos del ecuador.

En relación con la variación diurna por lo general observamos que durante la noche predomina la calma mientras que la velocidad máxima del viento se produce durante el día. La Figura 4.6 muestra la evolución durante el día de la velocidad del viento sobre una pradera en Córdoba durante el mes de junio: se observa que U es baja durante la noche, especialmente al amanecer, y que U se incrementa durante el día.

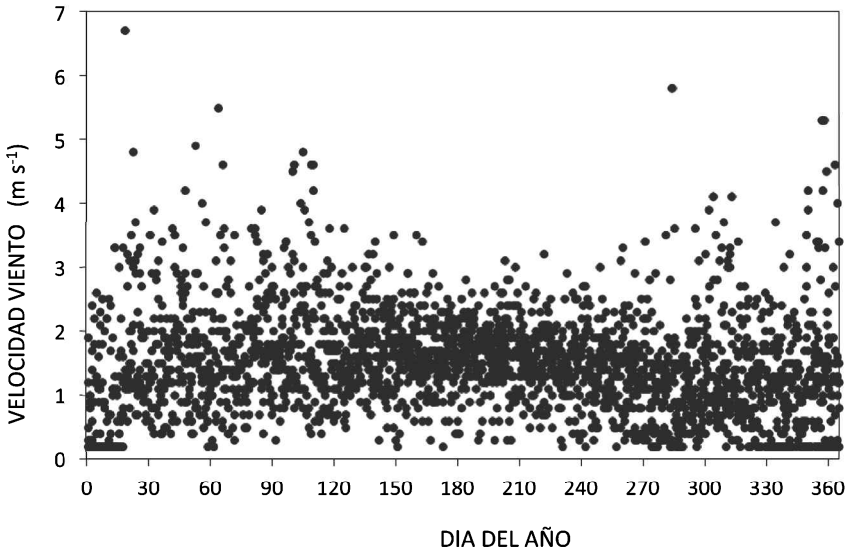


Figura 4.3. Velocidad media diaria del viento a 2 m de altura en Fuente Palmera (España) 2007-2013.

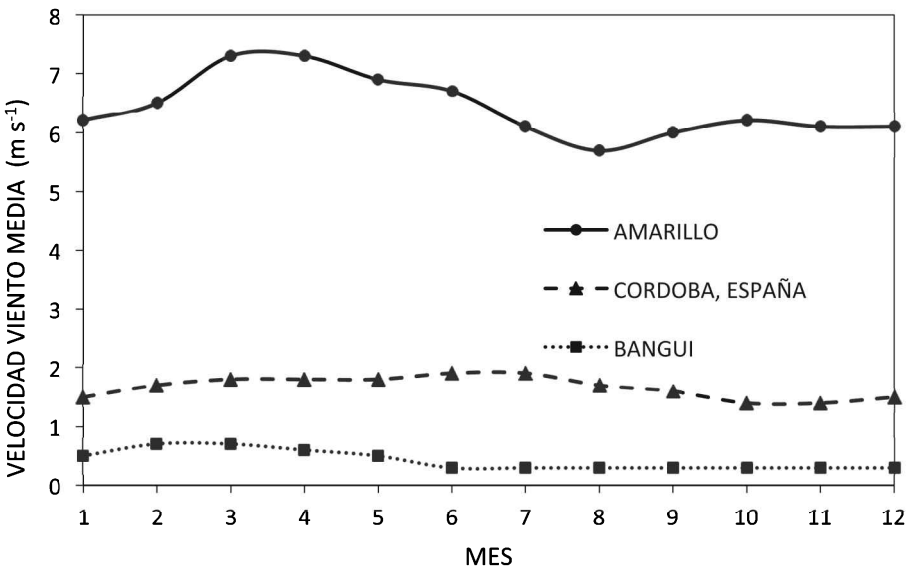


Figura 4.4. Evolución temporal de la velocidad del viento media mensual en Bangui (República Centroafricana), Amarillo (Texas, EE.UU.) y Córdoba (España).

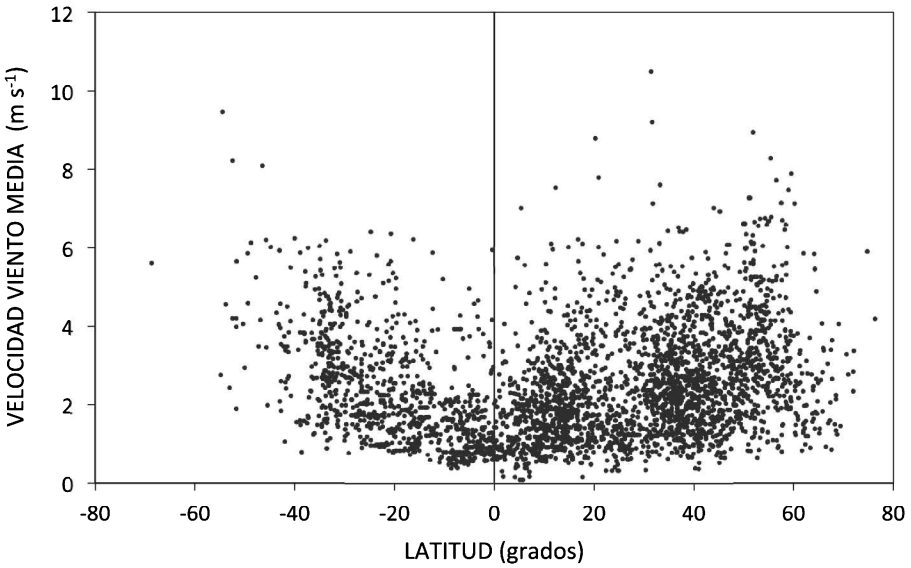


Figura 4.5. Velocidad media anual del viento para diferentes ubicaciones en función de la latitud. Fuente: CLIMWAT-FAO

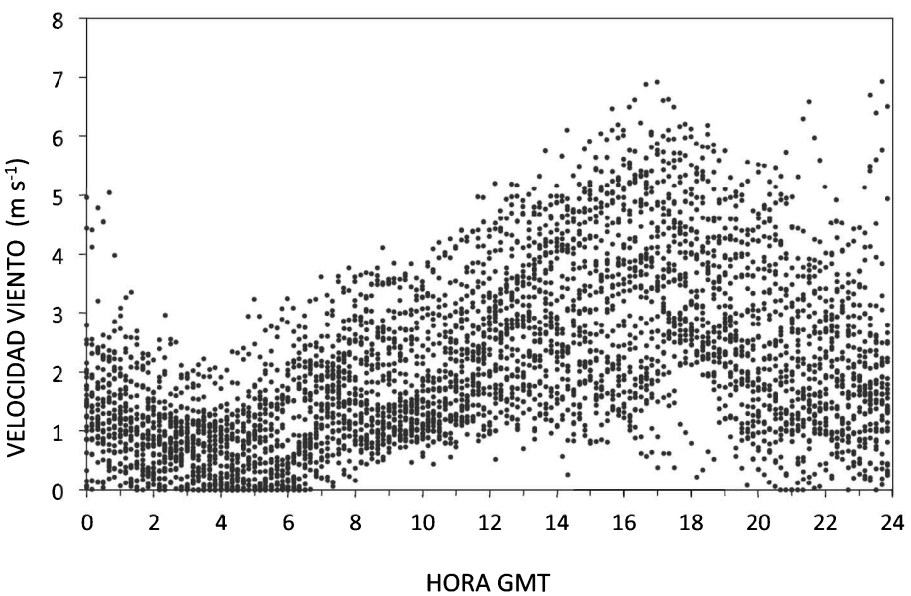


Figura 4.6. Velocidad del viento en Córdoba (España) durante el día en junio de 2003. Cada punto es la velocidad del viento promedio de 10 minutos.

Una rosa de los vientos es una representación gráfica de la distribución de la velocidad y dirección del viento en un lugar determinado durante un período específico de tiempo. Presentado en un formato circular, la rosa de los vientos muestra la frecuencia de los vientos que soplan desde cada dirección, por lo general clasificado en 16 direcciones cardinales, tales como norte (N), NNE, NE, etc., donde el Norte corresponde a 0º, el Este a 90º, el Sur a 180º y el Oeste a 270º. La distancia desde el centro representa la frecuencia de esa dirección en particular, que también puede ser dada para diferentes clases de velocidad del viento (véase el ejemplo en la Fig. 4.7).

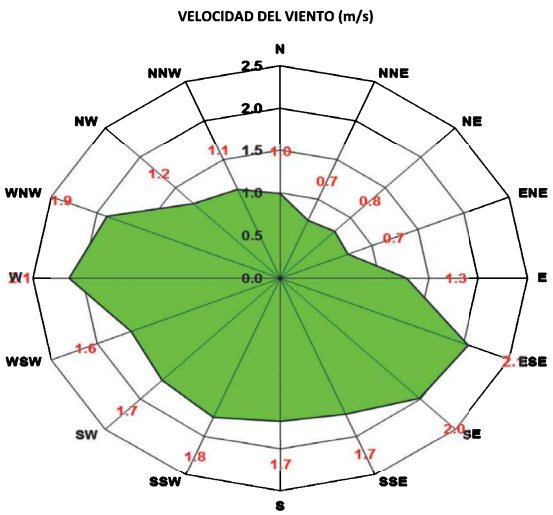


Figura 4.7. Rosa de los vientos para la velocidad del viento en Espiel (España) 2003-2012.

BIBLIOGRAFÍA

Campbell GS, Norman JM (1998) An introduction to environmental biophysics. Springer

Monteith J, Unsworth M (2013) Principles of Environmental Physics: Plants, Animals, and the Atmosphere. Academic Press

Rosenberg NJ, Blad BL, Verma SB (1983) Microclimate: The Biological Environment. John Wiley and Sons

Capítulo 5

La temperatura y la humedad del aire

F.J. VILLALOBOS
L. MATEOS
L. TESTI
E. FERERES

RESUMEN:

La temperatura del aire muestra perfiles inestables durante el día y estables durante la noche. Por lo tanto, la temperatura del cultivo es generalmente más alta que la del aire durante el día y más baja durante la noche. La transferencia de calor entre el cultivo y el ambiente es facilitada por la turbulencia y será más eficaz cuanto mayor sea la velocidad del viento, es decir, cuando la resistencia aerodinámica sea baja. En situaciones de atmósfera inestable, la turbulencia se ve reforzada (por la turbulencia térmica añadida), mientras que en una condición estable se reduce la turbulencia. El contenido de vapor de agua de la atmósfera puede ser expresada por diferentes variables (presión de vapor, humedad relativa, déficit de presión de vapor, relación de mezcla, densidad de vapor). El flujo de vapor de agua (equivalente a la energía gastada en forma de calor latente) entre el cultivo y la atmósfera es directamente proporcional a la diferencia de presión de vapor e inversamente proporcional a la suma de las resistencias aerodinámica y de la cubierta.

5.1. INTRODUCCIÓN

La temperatura del aire regula el funcionamiento de los ecosistemas terrestres. La temperatura del cultivo afecta a la fotosíntesis, a las tasas de crecimiento y desarrollo, a la transpiración, etc. Los cultivos se calientan mediante la absorción de la radiación. Parte de la energía absorbida se utiliza para calentar el aire (calor sensible) que, a su vez, determina la temperatura del aire por encima del cultivo.

La humedad del aire es importante en la producción de cultivos por varias razones. En primer lugar, el agua y/o humedad son esenciales para que los organismos que viven en el ecosistema agrícola puedan crecer y completar sus ciclos de vida. En segundo lugar, la humedad juega un papel importante en el intercambio de energía. El cambio de estado de agua líquida a vapor, que se produce en el proceso de evaporación, requiere 2.45 MJ/kg. Cuando 1 kg de vapor de agua se condensa y luego se congela, 2.8 MJ son liberados. El primer proceso relaciona la absorción de la radiación con el uso del agua por los cultivos y el segundo proceso es la base de algunos de los métodos utilizados para la protección contra las heladas en horticultura.

5.2. ESTABILIDAD TÉRMICA

Una porción de aire que se eleva adiabáticamente (véase el recuadro 5.1) de un nivel a otro más elevado está siempre a la misma temperatura (y, por tanto, tiene la misma densidad) que el aire circundante. El perfil de temperatura adiabática correspondiente se dibuja como la línea discontinua en la Figura 5.1. Consideremos ahora un perfil de temperatura real tal como el mostrado en la Figura 5.1 (derecha). En este caso, al elevar una masa de aire adiabáticamente desde el punto C a D, esa porción de aire tendrá una temperatura más alta que el aire circundante (D'), será menos denso y por lo tanto tiende a seguir subiendo. Esta condición atmosférica se llama inestable. Este ascenso adiabático sucede cuando un torbellino caliente salta repentinamente desde el cultivo por una ráfaga de viento. Si el movimiento es lo suficientemente rápido, el intercambio de calor entre el torbellino y el aire que encuentra será muy pequeño lo que permite la asunción de condiciones adiabáticas.

Supongamos ahora que el perfil real de temperatura es del tipo mostrado en la figura 5.1 (izquierda). En este caso, al elevar una porción de aire adiabáticamente, la temperatura será más baja que el aire circundante y su densidad será mayor, por lo que tenderá a volver a su altura original. Esta condición de la atmósfera se denomina estable y el perfil de temperatura se denomina perfil invertido.

Si el perfil real de temperatura sigue el perfil adiabático, la condición atmosférica correspondiente se llama neutra (línea de trazos en la figura 5.1).

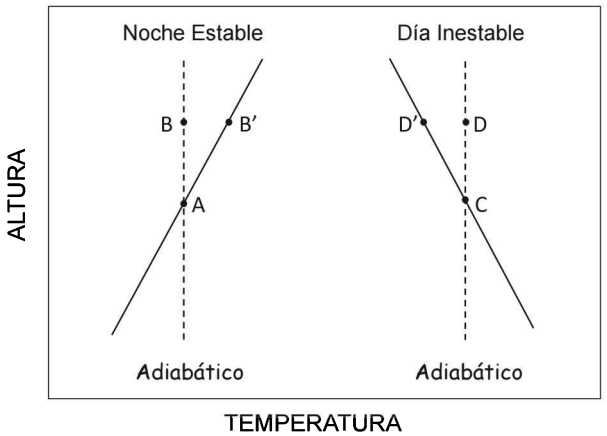


Figura 5.1. Perfiles de temperatura típicos durante el día y durante la noche.

Recuadro 5.1. Procesos adiabáticos

Un proceso (cambio de estado) que se produce sin ganancia o pérdida de calor se llama proceso adiabático. Si la presión de un volumen de aire cambia adiabáticamente de P_1 a P_2, el cambio de temperatura (de T_1 a T_2) viene dado por:

$$(T_2 / T_1) = (P_2/P_1)^{1-Cv/Cp}$$

donde C_p y C_v son los calores específicos del aire a presión constante y volumen constante, respectivamente.

La ecuación anterior implica que una masa de aire a presión 100 kPa y temperatura de 30ºC se enfriará a 20.8ºC si se ha levantado adiabáticamente a una altura donde la presión es 90 kPa. Este descenso de la temperatura a medida que aumenta la altura se llama gradiente adiabático. Su valor para el aire seco es de aproximadamente 0.01 K/m, mientras que para el aire húmedo muestra valores más bajos (aprox. 0.008 K/m).

5.3. PRINCIPIOS BÁSICOS RELATIVOS A LA HUMEDAD DEL AIRE

Según la ley de Dalton, la presión del aire en la atmósfera es la suma de la presión parcial de vapor de agua (e_a) y la presión parcial del aire seco (P_d). Ambas presiones parciales se pueden expresar como el producto de sus respectivas fracciones molares por la presión total (P).

A partir de una superficie de agua algunas moléculas se escapan en el proceso de evaporación, mientras que otras vuelven al estado líquido. Cuando el número de moléculas que escapan es igual al de las que regresan, el sistema ha alcanzado un es-

tado de equilibrio y se dice que el ambiente está saturado. En este estado, la presión de vapor ha alcanzado su valor de saturación (e_s). Para una temperatura dada existe un único valor de e_s y la relación entre las dos variables es una función exponencial:

$$e_s = 0.61078 \exp\left(\frac{17.27\,T}{237.3 + T}\right) \tag{5.2}$$

donde e_s está expresada en kPa, y T es la temperatura (ºC). La atmósfera por lo general no se encuentra en saturación, por lo que e_a será menor que e_s para esa temperatura.

La humedad relativa (%) indica el grado de saturación como:

$$RH = 100\,\frac{e_a}{e_s} \tag{5.3}$$

Sin embargo, ya que depende de la temperatura, no es un buen indicador de la cantidad de vapor de agua en el aire.

Otra variable para caracterizar la humedad del aire, ampliamente utilizada en ecología de los cultivos, es el déficit de presión de vapor (VPD), que es la diferencia $e_s - e_a$. Su valor da una idea del poder de secado de la atmósfera y, por tanto, es un factor clave que determina en gran medida la tasa de evaporación y la transpiración.

La humedad del aire también puede ser cuantificada por la temperatura del punto de rocío (T_d) que es la temperatura requerida para que una porción de aire a presión constante y contenido de vapor de agua constante, alcance la saturación. Si la temperatura del aire cae por debajo de T_d la condensación se iniciará. Este es el fenómeno que se puede ver en las mañanas frías cuando una película de agua cubre el suelo o las plantas.

La relación de mezcla es la relación entre masa de vapor de agua y masa de aire seco y se puede calcular (en g/kg) como:

$$X_v = 622\,\frac{e_a}{P_{at} - e_a} \tag{5.4}$$

donde P_{at} es la presión atmosférica (kPa) y e_a es la presión de vapor (kPa). Por último, la humedad del aire se puede expresar como densidad de vapor (ρ_v) también conocida como humedad absoluta, que es la masa de vapor de agua por unidad de volumen de aire, y se puede calcular (g de vapor de agua m^{-3}) como:

$$\rho_v = \frac{1000\,e_a}{0.4615\,T} \tag{5.5}$$

donde T es la temperatura del aire (K).

Ejemplo 5.1.

La temperatura del aire es 20ºC y la humedad relativa es del 80%. Vamos a calcular la presión de vapor, VPD, relación de mezcla, densidad de vapor y la temperatura del punto de rocío. Asumiremos la presión atmosférica normal (101.3 kPa).

En primer lugar se calcula la presión de vapor de saturación:

e_s=0.61078 exp[17.269 20/(20+237.3)] = 2.338 kPa

Por tanto: e_a = (HR/100) e_s = 80/100 x 2.338 = 1.87 kPa

VPD = e_s - e_a = 2.338 - 1.87 = 0.467 kPa

Relación de mezcla: X_v = 622 x 1.87/(101.3-1.87) = 11.7 g/kg

Densidad de vapor: ρ_v = 1000 x 1.87/(0.4615 x 293) = 13.83 g m^{-3}

La temperatura de rocío se puede deducir igualando la ecuación 5.2 a 1.87 kPa, que es la presión de vapor real, y despejando la temperatura:

$$T_d = \frac{237.3\ ln\left(\frac{e_a}{0.6108}\right)}{17.27 - ln\left(\frac{e_a}{0\,6108}\right)} = 16.44°C$$

Si este aire se enfría a 16.4ºC llegaríamos a saturación. Esto puede comprobarse introduciendo T = 16.44ºC en la Ec. 5,2, de la que se obtiene 1.87 kPa.

5.4. LOS PERFILES DE TEMPERATURA DENTRO Y POR ENCIMA DEL CULTIVO

La superficie del suelo o cultivo se va enfriando durante la noche ya que la radiación solar es cero, mientras que se mantiene su emisión de radiación de onda larga (R_n negativa). El aire en contacto con la superficie transfiere calor a la superficie, y por lo tanto también se enfría y aumenta su densidad. La consecuencia es que se desarrolla una inversión de la temperatura y la condición atmosférica es estable (Fig. 5.2).

Durante el día ocurre lo contrario. La superficie absorbe la radiación que, en parte, sirve para calentar las capas bajas de la atmósfera. Ahora la temperatura disminuye con la altura y la condición atmosférica es inestable (esto se puede ver claramente durante la tarde en la Figura 5.2).

La forma de los perfiles de temperatura tiene implicaciones importantes para la distribución temporal y espacial de la temperatura en los cultivos. A medida que nos acercamos a la superficie del cultivo, la oscilación térmica (diferencia entre la temperatura máxima y mínima) aumenta con máximas más altas y mínimas inferiores.

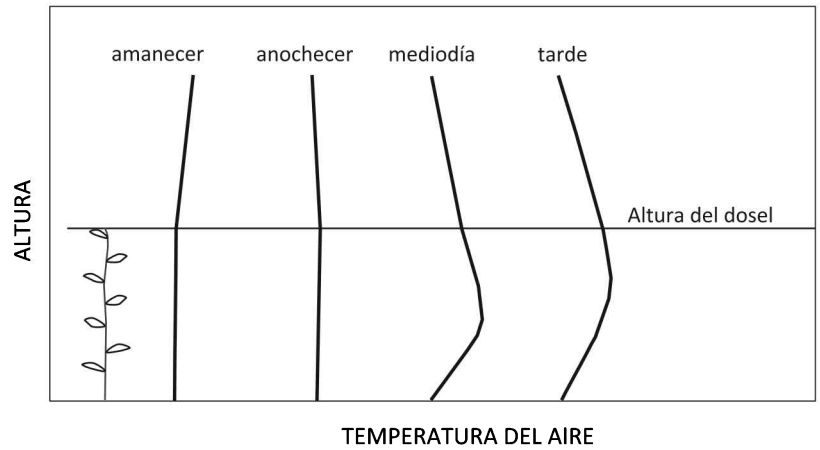


Figura 5.2. Perfiles de temperatura típicos encima y dentro de un cultivo.

Los perfiles invertidos de temperatura pueden ser observados también durante el día por enfriamiento debido a la evapotranspiración del cultivo. Esta situación es típica de verano, cuando el aire seco caliente sopla sobre los cultivos de regadío. El fenómeno se llama advección de calor sensible y se explora con más detalle en el Capítulo 7.

Tanto los perfiles de día y como los de noche, son en general muy variables y se ven afectados por otros factores, en particular la velocidad del viento. Cuando la velocidad del viento es muy alta, el perfil de temperatura por encima del cultivo es muy uniforme con la altura, de manera que la temperatura del aire y del cultivo son similares. Por el contrario, con poco viento el perfil de temperatura es muy acusado y el cultivo está mucho más caliente que el aire (durante el día) o mucho más frío (durante la noche). Los perfiles de temperatura (estable o inestable) tienen un efecto importante en la turbulencia (recuadro 5.2).

Recuadro 5.2. Efectos de la estabilidad atmosférica sobre la turbulencia

El tratamiento matemático de los efectos de la estabilidad sobre la turbulencia se encuentra fuera del alcance de este libro. Sin embargo, podemos hacer algunas observaciones sobre la importancia de la estabilidad. Durante el día, el transporte turbulento está asegurado ya que la velocidad del viento es mayor. Si la velocidad del viento es baja, se mantendrá la turbulencia por el incremento de la contribución térmica. Por tanto, sólo en raras ocasiones la falta de turbulencia durante el día puede restringir el transporte vertical de energía o materia. Lo contrario ocurre durante la noche ya que la velocidad del viento es generalmente inferior y el perfil de temperatura se invierte. Eso crea una capa por encima del cultivo donde la turbulencia prácticamente no existe de manera que H y LE son pequeñas y el enfriamiento del cultivo iguala prácticamente la pérdida de radiación de onda larga.

Los perfiles de temperatura dentro del cultivo son muy diferentes de los observados por encima. Durante el día, en general, la temperatura alcanza un máximo en el nivel donde la densidad foliar es más alta. Una alta densidad foliar permite una mayor absorción de radiación y por lo tanto una temperatura más alta. Por encima de este nivel, el perfil de temperatura durante el día es generalmente inestable y por debajo por lo general es ligeramente invertido. Durante la noche, el perfil dentro del cultivo es generalmente isotérmico ya que el cultivo atrapa radiación y la re-emite hacia el suelo (Fig. 5.3).

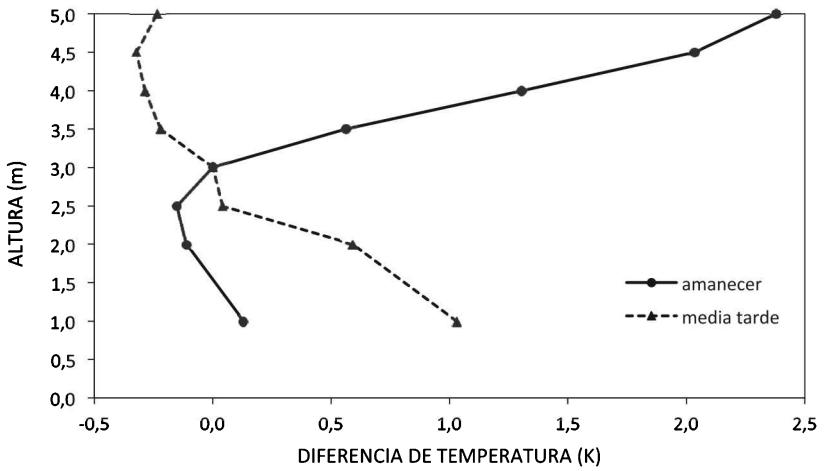


Figura 5.3. Perfiles de temperatura del aire por encima y dentro de un olivar en seto de 3.25 m de altura en un día de verano (30 de julio de 2011) cerca de Córdoba (España). Los valores se muestran como desviaciones de la temperatura medida a 3.0 m de altura.

5.5. PERFILES DE HUMEDAD DEL AIRE POR ENCIMA DEL CULTIVO

Durante el día, a causa de la transpiración, la presión de vapor es alta cerca de la superficie del cultivo y disminuye con la altura. El vapor de agua se elimina más rápido conforme aumenta el viento y el transporte turbulento. Por lo tanto, los perfiles más pronunciados se producen al mediodía cuando la evapotranspiración es alta y el vapor de agua es fácilmente eliminado. El perfil de presión de vapor durante la noche es mucho más uniforme, y puede incluso aumentar con la altura en noches cuando se produce la deposición de rocío.

5.6. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA TEMPERATURA DEL AIRE Y LA HUMEDAD

La variación de la temperatura del aire a lo largo de un día despejado sigue una función senoidal con el mínimo alrededor del amanecer y un máximo que se produce 2-3 horas después del máximo de radiación (Fig 5.4). El retraso de la temperatura del aire

respecto a la radiación es debido al equilibrio entre la energía que llega a la superficie y la energía que se utiliza. Parte de la radiación durante la mañana se emplea en calentar el suelo y el cultivo. Una vez que estas superficies se han calentado, habrá una transferencia de calor al aire que entonces se calienta. Además, otros factores (como la advección) pueden contribuir a elevar la temperatura del aire durante la tarde.

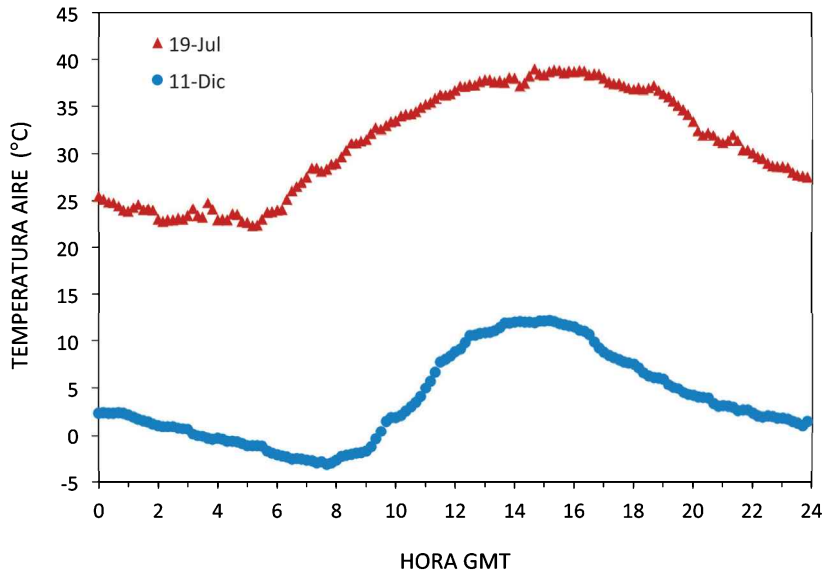


Figura 5.4. Evolución temporal de la temperatura del aire durante un día de verano (19 de julio de 2012) y un día a finales de otoño (11 de diciembre de 2012) en Espiel (España).

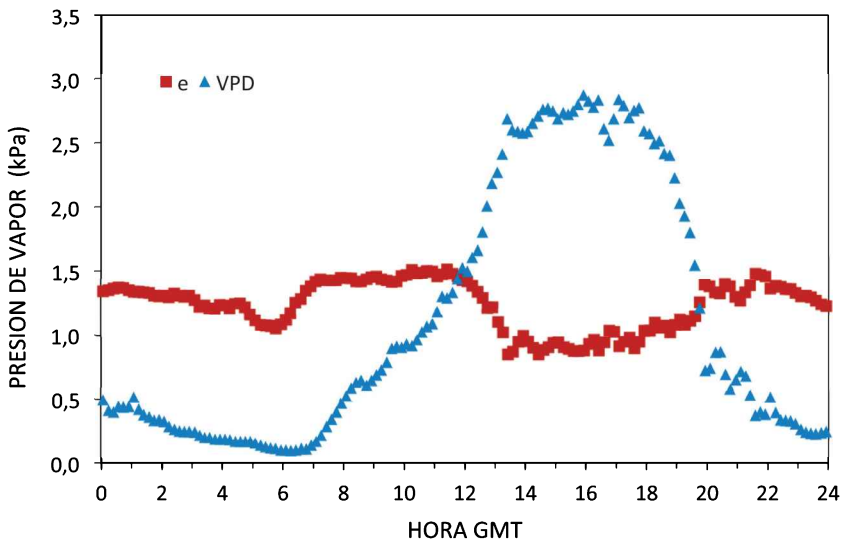


Figura 5.5. Evolución temporal de la presión de vapor y el déficit de presión de vapor a lo largo del día en un día de primavera (5 Mayo 2013) en Córdoba (España).

La presión de vapor varía relativamente poco en comparación con otras variables relacionadas con la humedad. Por lo tanto las variaciones en VPD a lo largo del día se deben principalmente a las variaciones de temperatura del aire. En cualquier caso, la presión de vapor cerca del cultivo es proporcional a la velocidad de evaporación, por lo que será más alta durante el mediodía (Fig. 5.5).

En contraste con la presión de vapor, la humedad relativa máxima se produce durante la noche, ya que, aunque el contenido de vapor de agua de la atmósfera es algo más bajo, la temperatura es mucho menor. La humedad relativa mínima se produce en algún momento después del mediodía porque a pesar de que entonces la presión de vapor puede ser alta, la temperatura también será alta.

Para el cálculo de la presión de vapor media diaria como una función de RH máxima y mínima se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$e_{avg} = 0.5 \left(e_{sx} \frac{RH_n}{100} + e_{sn} \frac{RH_x}{100} \right)$$

donde RH_n and RH_x son la RH mínima y máxima, respectivamente, y e_{sx} y e_{sn} son los valores de presión de vapor en saturación para las temperaturas máxima y mínima, respectivamente. Por lo tanto el VPD promedio será:

$$VPD_{avg} = 0.5 \left[e_{sx} \left(1 - \frac{RH_n}{100} \right) + e_{sn} \left(1 - \frac{RH_x}{100} \right) \right] \quad (5.7)$$

Las curvas anuales de las temperaturas máximas y mínimas del aire siguen un patrón muy similar a la curva diaria (Fig. 5.6). Algo similar ocurre para la presión de vapor.

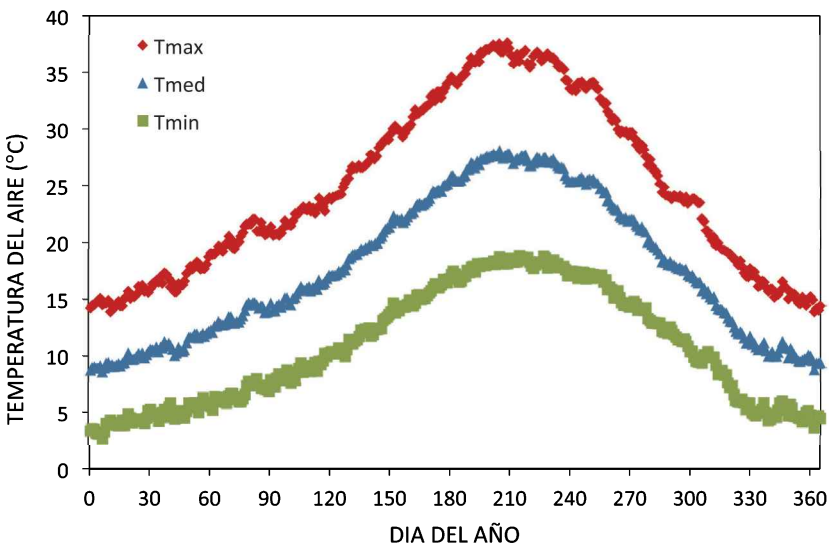


Figura 5.6. Evolución temporal del valor medio de la temperatura del aire máxima, mínima y media. Córdoba (España). 1964-2002.

La Figura 5.7 muestra la presión de vapor media mensual en 2 lugares con la misma latitud (31.8ºS) pero con baja (Klawer, África del Sur) y alta precipitación (Pelotas, Brasil). En ambos lugares la presión de vapor es máxima en verano y mínima en invierno, pero las dos curvas reflejan claramente la diferencia en precipitación.

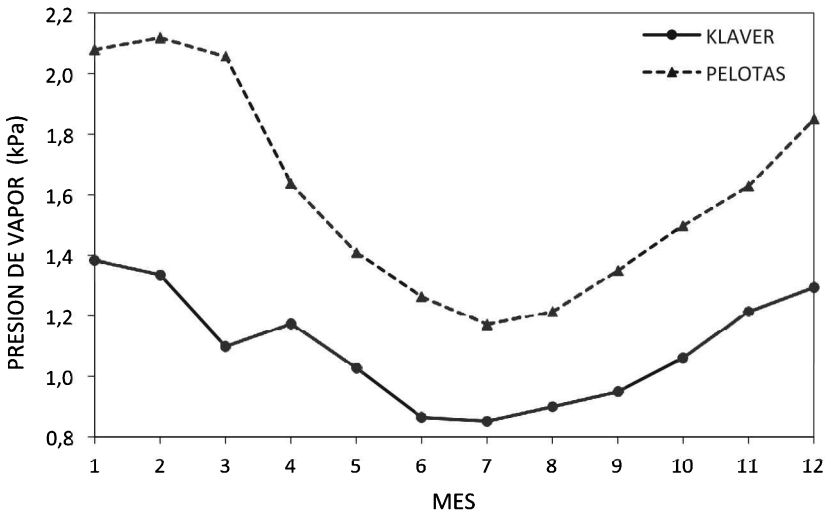


Figura 5.7. Evolución temporal de la presión de vapor media mensual para dos localidades, Pelotas (Brasil) con una precipitación media anual de 1395 mm y Klawer (Sudáfrica) con una media de precipitación anual de 174 mm.

En promedio, el mínimo y el máximo de temperatura se producen con un cierto retraso con respecto al mínimo y máximo de radiación, respectivamente. Esto se ve, por ejemplo, en la Figura 5.8, que muestra las curvas anuales de radiación media y temperatura en Córdoba, normalizada con respecto a sus valores extremos. Las razones del retraso entre las ondas de temperatura y radiación son similares a las descritas para las curvas diarias. Durante la primavera parte de la radiación se utiliza para calentar el suelo. A medida que la temperatura del suelo se eleva por encima de la temperatura del aire, más energía estará disponible para ser convertida en calor sensible. Un razonamiento similar se puede aplicar para explicar cuándo se produce la temperatura mínima de invierno.

Las amplitudes de las ondas de la temperatura del aire, tanto para los ciclos diarios como para los anuales, dependen en gran medida del reparto de energía entre la evaporación y el calentamiento del suelo y el aire, como veremos en las siguientes secciones. Así, en las zonas áridas la amplitud será más alta que en las zonas húmedas (o cerca del mar).

Las temperaturas máximas esperadas en verano están típicamente entre 30 y 45ºC con los valores más altos ocurriendo en las latitudes medias (Fig. 5.9). Los valores mínimos de invierno son alrededor de 20ºC para la latitud cero y disminuyen a me-

dida que nos movemos hacia el Norte o el Sur (Fig. 5.10). La variación de la presión de vapor media anual es paralela a la de la temperatura mínima en invierno (Fig. 5.11).

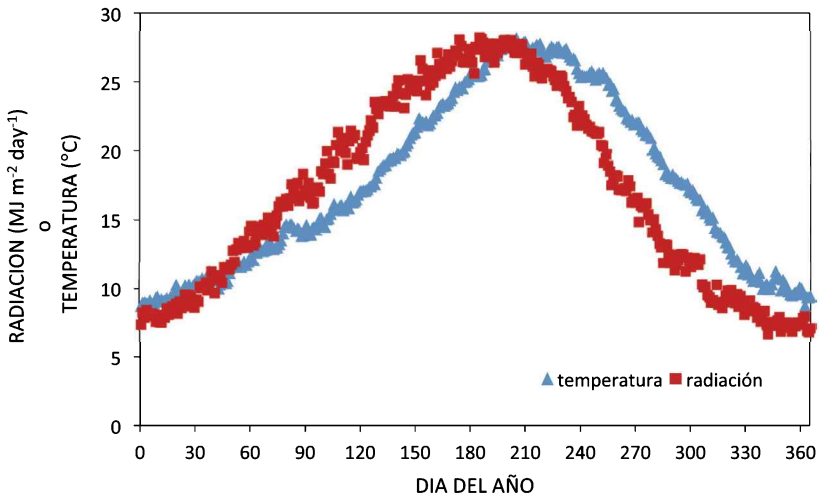


Figura 5.8. Evolución temporal de la temperatura media del aire y la radiación solar. Córdoba (España). 1964-2002.

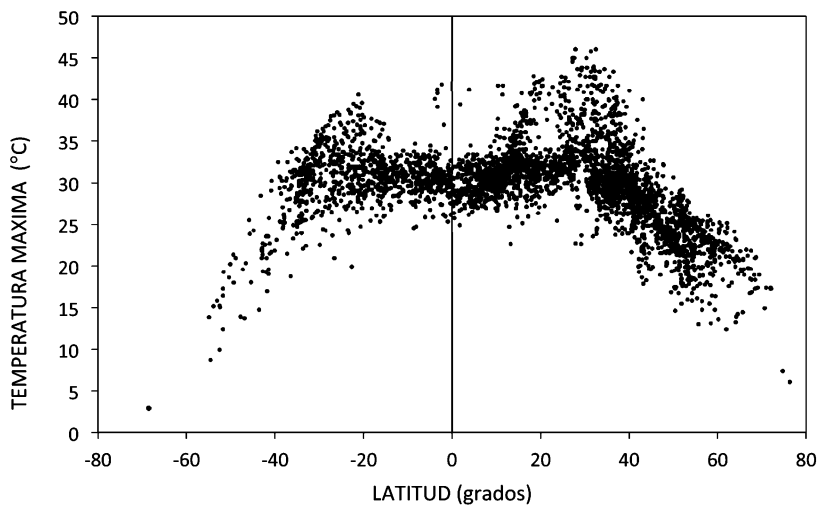


Figura 5.9. Temperatura máxima media en julio (latitudes Norte) o enero (latitudes del Sur) en función de la latitud. Solamente los lugares con altitud inferior a 1000 m se han incluido.

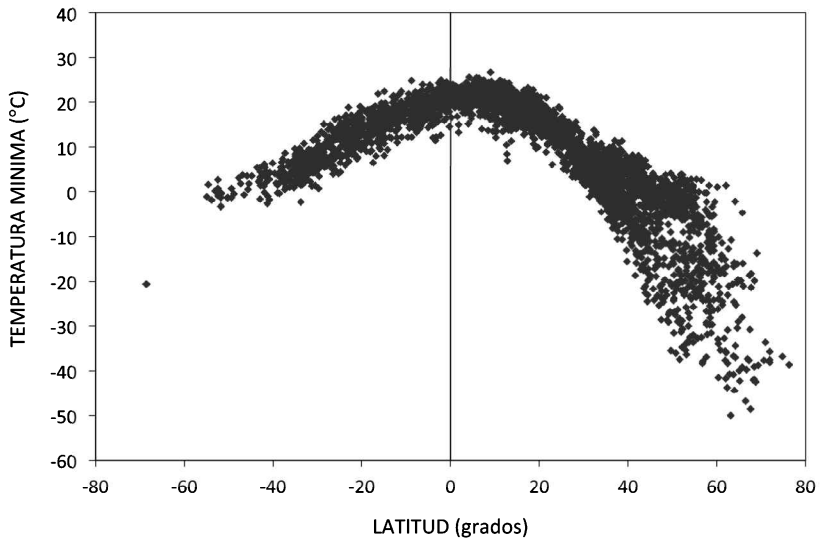


Figura 5.10. Temperatura mínima media en febrero (latitudes Norte) o agosto (latitudes del Sur) en función de la latitud. Solamente los lugares con altitud inferior a 1000 m se han incluido.

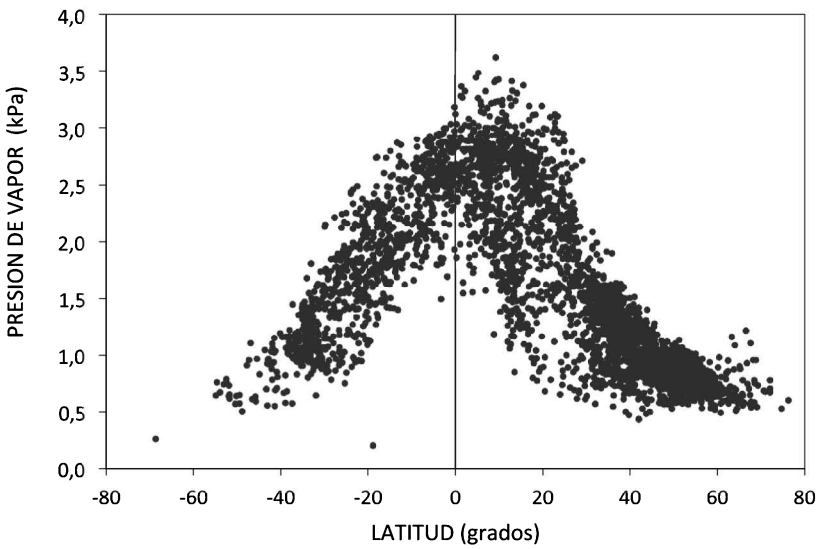


Figura 5.11. Presión de vapor media anual para diferentes ubicaciones en función de la latitud.

5.7. FLUJO DE CALOR SENSIBLE

Una consecuencia de los gradientes de temperatura que se producen sobre los cultivos será un flujo de calor sensible (transferencia de calor por convección) desde las capas de temperatura más alta a las de temperatura más baja. Normalmente, el

flujo se dirige hacia el cultivo durante la noche y desde el cultivo hacia la atmósfera durante el día. El término "sensible" significa que este flujo tiene un efecto que se puede detectar, ya que implica cambios en la temperatura del aire.

La transferencia de calor sensible es controlada principalmente por la turbulencia. El flujo de calor sensible (H) entre la cubierta y la atmósfera a una altura z, donde la temperatura es T_a se puede calcular como:

$$H = \rho\, C_p\, \frac{T_c - T_a}{r_{aH}} \tag{5.8}$$

donde ρ es la densidad del aire, C_p es el calor específico del aire a presión constante, T_c es la temperatura del cultivo y r_{aH} es la resistencia aerodinámica para el transporte de calor (s m^{-1}).

El producto ρ C_p (unidades J K^{-1} m^{-3}) se puede calcular como:

$$\rho\, C_p = \rho_a \left(1.01 + 1.88\, \frac{X_v}{1000}\right) = \frac{29 \cdot 10^3\, P_{at}}{8.31\, T} \left(1.01 + 1.88\, \frac{0.622\, e}{P_{at} - e}\right) \tag{5.9}$$

donde ρ_a es la densidad del aire seco (g m^{-3}), X_v es la relación de mezcla (g kg^{-1}), e es la presión de vapor (kPa) y P_{at} (en kPa) es la presión atmosférica que puede calcularse como función de la altitud (AL, m) como:

$$P_{at} = 101.3 \quad \left(1 - \frac{AL}{44308}\right)^{5.2568} \tag{5.10}$$

El cálculo de r_{aH} no es sencillo ya que depende de la estabilidad atmosférica. Para condiciones neutras, se puede aplicar la siguiente:

$$r_{aH} = \frac{\ln\left(\frac{z - d_z}{z_0}\right) \ln\left(\frac{z - d_z}{z_{0H}}\right)}{k_k^2\, U(z)} \tag{5.11}$$

donde z_{0H} es la longitud de rugosidad para el intercambio de calor que puede ser estimada como 0.2 z_0.

5.8. FLUJO DE CALOR LATENTE

El vapor de agua fluye normalmente desde la superficie del suelo o desde el cultivo hacia el aire por encima del cultivo. Esto implica un flujo de calor latente necesario para la evaporación del agua. Un flujo de vapor de agua hacia abajo y por lo tanto un flujo de calor latente negativo ocurre en casos de deposición de rocío. De forma

análoga a la empleada para los flujos de momento o de calor sensible, el flujo de calor latente (LE) se expresa como:

$$LE = \frac{\rho\, C_p}{\gamma} \frac{e_{sc} - e_a}{r_{aW} + r_c} \tag{5.12}$$

donde γ es la constante psicrométrica (alrededor de 0.067 kPa/K), e_{sc} es la presión de vapor de saturación a la temperatura del cultivo, r_c es la resistencia de la cubierta y r_{aW} es la resistencia aerodinámica al flujo de vapor de agua, que debe ser igual a la resistencia aerodinámica para el transporte de calor (Ec. 5.11). Hay que tener en cuenta que al escribir esta ecuación estamos considerando el gradiente de presión de vapor entre el interior de las hojas, es decir, en las cavidades subestomáticas (donde el aire está saturado y a la misma temperatura que el cultivo) y el aire por encima. Por lo tanto la transferencia de vapor de agua se ve afectada por dos resistencias en serie, una debida a los estomas y otra debida a las condiciones aerodinámicas. La resistencia de la cubierta es entonces un parámetro que refleja el grado de cierre de los estomas y se discute con más detalle en el Capítulo 9. Los valores típicos de r_c son 40-80 s/m para cultivos anuales y bien regados y 100-200 s/m para bosques y algunos frutales (por ejemplo, olivo) con un buen suministro de agua. En situaciones de déficit hídrico, r_c puede alcanzar valores mucho más altos que los indicados anteriormente.

BIBLIOGRAFÍA

Campbell GS, Norman JM (1998) An introduction to environmental biophysics. Springer.

Monteith J, Unsworth M (2013) Principles of Environmental Physics: Plants, Animals, and the Atmosphere. Academic Press.

Rosenberg NJ, Blad BL, Verma SB (1983) Microclimate: The Biological Environment. John Wiley and Sons.

Capítulo 6

La temperatura del suelo y el flujo de calor al suelo

F.J. VILLALOBOS
L. TESTI
L. MATEOS
E. FERERES

RESUMEN:

El régimen de temperatura del suelo depende de sus propiedades térmicas (calor específico, conductividad térmica, difusividad térmica y admitancia térmica). Los principales factores que afectan al régimen térmico son el contenido de agua, la textura del suelo y la compactación. La velocidad de calentamiento (o enfriamiento) del suelo es proporcional a su difusividad que es mayor en suelos arenosos. La cantidad de energía almacenada en el suelo es proporcional a su admitancia térmica. El calentamiento del suelo se produce como un tren de ondas cuya amplitud disminuye con la profundidad y con un desfase que también aumenta con la profundidad.

6.1. INTRODUCCIÓN

El flujo de calor en el suelo es un componente importante del balance de energía de los cultivos. El suelo actúa como un gran acumulador de energía que almacena calor durante el día y lo libera durante la noche. Algo similar sucede en términos anuales. El equilibrio de estos intercambios determina la evolución temporal de la temperatura del suelo. La temperatura del suelo es importante en muchos procesos de crecimiento y desarrollo del cultivo, tales como la germinación de semillas, el crecimiento y la distribución de las raíces en el suelo, la absorción de nutrientes, la respiración de las raíces, la actividad microbiana, etc.

6.2. PROPIEDADES TÉRMICAS DEL SUELO

El calor específico del suelo es el calor necesario para elevar 1 K la temperatura de la unidad de masa (calor específico por unidad de masa, C_M) o unidad de volumen (calor específico por unidad de volumen, C_V) de suelo. C_M y C_V están relacionados a través de la densidad del suelo ($C_V = \rho\, C_M$). Utilizando las definiciones de densidad aparente (ρ_b = masa de sólidos/volumen) y el contenido de agua gravimétrico (θ_g = masa de agua/masa de sólidos), la relación entre C_M y C_V también se puede expresar como:

$$C_V = \rho_b(1 + \theta_g)C_M \tag{6.1}$$

C_V se puede calcular como la suma de los calores específicos de los componentes del suelo (aire, agua, fracción sólida), ponderados por las densidades de cada uno de estos componentes:

$$C_V = \frac{M_{sólido}}{V} C_{M\,sólido} + \frac{M_{agua}}{V} C_{M\,agua} + \frac{M_{aire}}{V} C_{M\,aire} \tag{6.2}$$

donde M y C_M se refieren a la masa y al calor específico por unidad de masa, respectivamente, para cada componente. Despreciando el tercer término, debido al pequeño calor específico del aire, suponiendo que $C_{M\,solido}$ = 0.85 J/g/ K y reorganizando:

$$C_V = \rho_b\left(C_{M\,sólido} + \theta_g C_{M\,agua}\right) = \rho_b\left(0.85 + 4.18\,\theta_g\right) = 0.85\,\rho_b + 4.18\,\theta_v \tag{6.3}$$

Esta ecuación muestra que el calor específico del suelo por unidad de volumen aumenta linealmente con el contenido volumétrico de agua (θ_v) y con la densidad aparente del suelo.

6.3. FLUJO DE CALOR EN EL SUELO

Al aplicar la ley de la conducción de calor de Fourier, el flujo de calor en el suelo *(J)* se puede expresar como:

$$J = -k \frac{dT}{dz} \tag{6.4}$$

donde *dT/dz* es el gradiente de la temperatura y *k* la conductividad térmica del suelo. Cuando se hace referencia a *J* en la superficie del suelo (z = 0), se denota *G.*

La conductividad térmica tiene unidades de W/m/K y depende de la porosidad del suelo, del contenido de agua y del contenido de materia orgánica. La dependencia de *k* con el contenido de agua del suelo es compleja. La conductividad térmica de un suelo muy seco aumenta rápidamente cuando se añade una pequeña cantidad de agua. Esto se debe a que cantidades relativamente grandes de energía se pueden transferir por evaporación y posterior condensación de agua en los poros del suelo. Por ejemplo, para un suelo arenoso, k puede aumentar desde 0.53 a 1.1 W/m/K cuando su contenido de agua aumenta desde el punto de marchitez permanente (PMP) hasta capacidad de campo. Un aumento adicional del contenido de agua del suelo hasta saturación implica un aumento más pequeño en k, ya que la difusión del vapor de agua está restringida al estar los poros llenos de agua (Tabla 6.1). Por lo tanto, la conductividad térmica de los suelos húmedos se ve afectada muy poco por las variaciones de contenido de agua en ese rango.

El cambio con el tiempo del calor almacenado en una capa de suelo de espesor Δz tiene que ser igual a la diferencia entre el flujo de calor que entra, J(z), y el flujo de calor que sale, J(z+Δz), por lo que, usando la Ec. 6.4 podemos escribir:

$$\rho\, C_M\, \Delta z \frac{\partial T}{\partial t} = \Delta z \frac{\partial J}{\partial z} = \Delta z \frac{\partial}{\partial z}\left(k \frac{\partial T}{\partial z}\right) \tag{6.5}$$

y suponiendo que *k* no varía con la profundidad, se obtiene:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \tag{6.6}$$

donde D es la difusividad térmica (m^2/s), definido como k/C_v. De acuerdo con la Ec. 6.6 la difusividad térmica caracteriza la rapidez con que se calienta o enfría un suelo.

Mediante la adición de agua a un suelo muy seco, *k* inicialmente aumenta más rápido que C_v de modo que *D* también aumenta con el contenido de agua. Sin em-

bargo, en un suelo húmedo, k aumenta más lentamente que C_v de modo que D se convierte en constante o incluso puede disminuir. Como se muestra en la Tabla 6.1 la difusividad de un suelo arenoso es más alta que la de un suelo arcilloso especialmente cuando está húmedo. Además hay que señalar que la difusividad varía poco con los cambios en el contenido de agua en suelos arcillosos y más en los arenosos.

Tabla 6.1. Propiedades térmicas de los suelos y de los componentes del suelo (basados en Monteith, 1973). Hemos asumido densidades aparentes de 1.5, 1.4 y 1.3 t/m^3 para suelos arenosos, francos y arcillosos, respectivamente. Para cada tipo de suelo, la tabla muestra las propiedades térmicas para contenidos de agua en punto de marchitez, capacidad de campo y saturación.

Componente	Densidad	Calor específico				
		Unidad de masa	Unidad de volumen	Conductividad térmica	Difusividad térmica	Admitancia térmica
COMPONENTES	**t/m^3**	**MJ/t/K**	**MJ/m^3/K**	**W/m/K**	**10^{-6} m^2/s**	**J/K/m^2/s$^{0.5}$**
Aire a 20ºC	0.0012	1.01	0.001212	0.025	20.63	5.5
Agua	1	4.18	4.18	0.57	0.14	1544
Minerales del suelo	2.65	0.87	2.31	2.5	1.08	2403
Cuarzo	2.66	0.8	2.13	8.8	4.14	4327
Arcilla	2.65	0.9	2.39	2.92	1.22	2639
Granito	2.64	0.82	2.16	3	1.39	2545
Materia orgánica	1.3	1.92	2.5	0.25	0.1	790
SUELOS						
Arenoso PM	1.53	0.93	1.43	0.53	0.37	871
Arenoso CC	1.59	1.06	1.68	1.1	0.65	1359
Arenoso SAT	1.87	1.52	2.85	1.8	0.63	2265
Franco PM	1.52	1.13	1.72	0.65	0.38	1057
Franco CC	1.67	1.41	2.35	0.8	0.34	1371
Franco SAT	1.84	1.66	3.06	1.1	0.36	1835
Arcilloso PM	1.57	1.44	2.26	0.7	0.31	1258
Arcilloso CC	1.7	1.65	2.8	0.8	0.29	1497
Arcilloso SAT	1.77	1.8	3.18	0.9	0.28	1692

6.4. VARIACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA TEMPERATURA DEL SUELO

Cuando un suelo está expuesto a la radiación solar, parte de ella se refleja y parte se absorbe, aumentando su temperatura durante una parte del día. La temperatura tiende a disminuir durante la noche, cuando no hay entrada de energía radiante y el calor se transfiere al resto del suelo y/o se irradia a la atmósfera. Los suelos están sometidos a una entrada cíclica de energía de frecuencia diaria o anual.

Para analizar el comportamiento cíclico de la temperatura del suelo utilizaremos *T(z, t)* para denotar temperatura a la profundidad z y el tiempo t. Vamos a suponer que la temperatura de la superficie del suelo sigue una función senoidal:

$$T(0,t) = T_m + A(0)\text{sen}\,(\omega\, t) \tag{6.7}$$

donde T_m es la temperatura media en superficie, A(0) es la amplitud de la onda de temperatura en la superficie, $\omega = 2\pi / P_o$, y P_o es el período de las oscilaciones de temperatura (86400 s para ciclos diarios y 31536000 s para los ciclos anuales). Con esta condición de contorno, podemos integrar la ecuación diferencial 6.6:

$$T(z,t) = T_m + A(0)e^{-z/M}\text{sen}\,(\omega\, t - z/M) \tag{6.8}$$

donde $M = (2D/\omega)^{0.5}$ (m) es la denominada profundidad de amortiguación que determina la atenuación de la amplitud de la onda con la profundidad y el desfase temporal.

La ecuación anterior indica que la amplitud de la onda de temperatura decae exponencialmente con la profundidad en el suelo. Por otra parte, la onda se desfasa en proporción a la profundidad, es decir, la temperatura máxima se produce más tarde a medida que aumenta la profundidad. Ambas deducciones se reflejan en la Figura 6.1 que representa la evolución diaria de la temperatura del suelo medida a varias profundidades. La tendencia anual muestra un patrón similar (Fig. 6.2).

La profundidad a la que se produce la mayor parte del intercambio de calor se denomina profundidad efectiva y es igual a $(2\ M)^{0.5}$. La densidad de flujo de calor en la superficie del suelo puede deducirse diferenciando la Ec. 6.8, aplicando la ecuación 6.4 y haciendo z=0, lo que conduce a:

$$G = \sqrt{2}\, A(0)\frac{k}{M}\,\text{sen}\,(\omega\, t + \pi/4) \tag{6.9}$$

Esta ecuación indica que la onda de la temperatura en la superficie (Ec. 6.7) y el flujo de calor tienen un desfase de π/4, es decir, la temperatura máxima se produce 3 horas después del máximo G (ciclo diario) o 46 días (ciclo anual). Si el máximo de

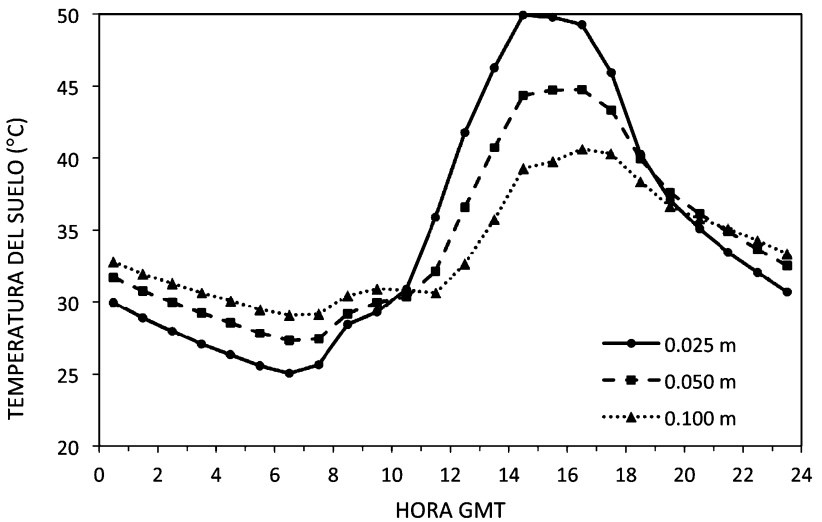


Figura 6.1. Variación diaria de la temperatura del suelo a distintas profundidades (0.025, 0.050 y 0.10 m) en un olivar. Córdoba (España). 19 de Julio de 2004.

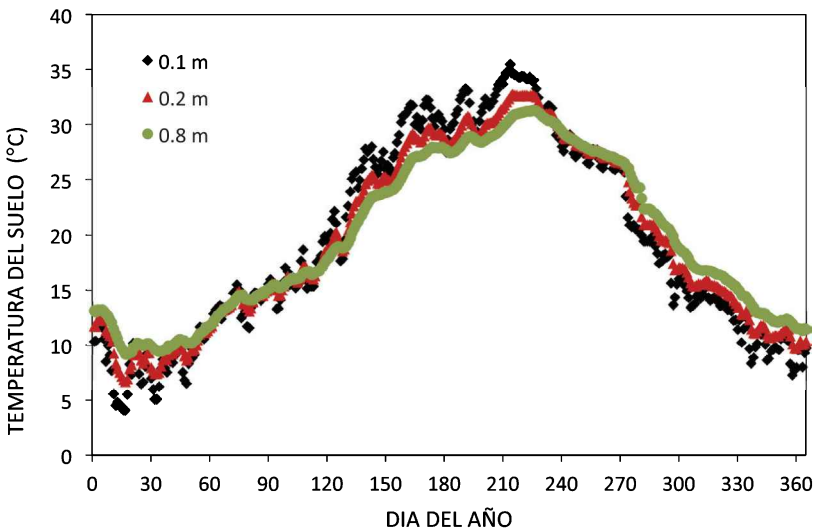


Figura 6.2. Variación anual de la temperatura del suelo a distintas profundidades (0.10, 0.20 y 0.80 m) en un olivar. Córdoba (España). 2003.

G se produce en el momento de máxima radiación, (1200 h, hora solar), entonces la temperatura de la superficie debe alcanzar su máximo a las 1500 h (hora solar) para ciclos diarios. Para los ciclos anuales la temperatura máxima debe producirse el día 216 (5 de agosto) en el hemisferio norte y el día 36 (5 de febrero) en el hemisferio sur.

El flujo de calor en la superficie del suelo puede ser integrado sobre medio ciclo para determinar la entrada de calor total en el suelo:

$$\int G = \sqrt{2}\, M\, A(0) C_v = \sqrt{\frac{2\, P_0}{\pi}} \sqrt{k\, C_v}\, A(0) \tag{6.10}$$

Este flujo total que entra en el suelo en medio ciclo será igual al que sale en el otro medio ciclo ya que partimos de un modelo sinusoidal de la temperatura, es decir, la temperatura al final del período es igual a la temperatura inicial. De acuerdo con la ecuación 6.10 la cantidad de calor almacenada en el suelo (y liberado por el suelo) será proporcional a $(k\ C_v)^{0.5}$ que se denomina admitancia térmica y tiene las unidades de J K^{-1} m^{-2} $s^{-0.5}$. En los suelos arenosos la admitancia térmica aumenta drásticamente con el contenido de agua desde valores de menos de 1000 en PM hasta más de 2000 J K^{-1} m^{-2} $s^{-0.5}$ en saturación (Tabla 6.1). En suelos arcillosos la admitancia cambia poco con el contenido de agua.

La amplitud de la onda de temperatura disminuye con la textura del suelo en el orden arenoso-franco-arcilloso. Este orden se debe a diferencias en la admitancia térmica. En condiciones de clima mediterráneo, al final del invierno, los suelos a menudo se encuentran húmedos. Los suelos arenosos tienen una difusividad más alta que los suelos arcillosos, por lo que se calentarán más rápidamente en la primavera. Si el contenido de agua es alto en otoño, los suelos arenosos también se enfriarán más rápido, lo cual tiene implicaciones agronómicas en la decisión acerca de la fecha de siembra. Por el contrario, si el suelo está muy seco la difusividad de

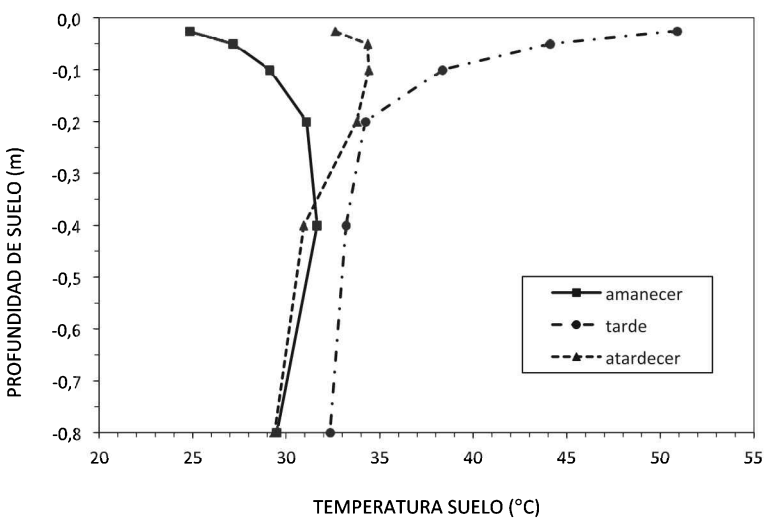


Figura 6.3. Perfiles de temperatura del suelo en un área expuesta de un olivar. Córdoba (España) 3 de Agosto de 2002.

suelos arenosos y arcillosos es muy similar, por lo que no se deben esperar diferencias significativas en su régimen térmico.

El perfil de temperatura en el suelo cambia significativamente durante el día (Fig. 6.3). Por la mañana temprano, la superficie del suelo es la zona más fría y por la tarde se convierte en la más caliente. El perfil a lo largo de la mayor parte del día indica un flujo de calor hacia abajo mientras que durante la noche el flujo es hacia la superficie.

6.5. EFECTOS DE LA EVAPORACIÓN Y EL VIENTO SOBRE LA TEMPERATURA DEL SUELO

La predicción de la temperatura del suelo en un momento dado para una profundidad concreta es importante a la hora de tomar algunas decisiones agronómicas. La importancia práctica de la comprensión del flujo de calor del suelo se hará más evidente cuando se aborde el balance de energía en la superficie de la Tierra en el Capítulo 7.

Para un suelo seco en superficie sin evaporación la relación entre el calentamiento del suelo y el calentamiento de la atmósfera se puede expresar como:

$$\frac{G}{H} = \frac{\sqrt{k\, C_v}}{\mu_{atm}} \tag{6.11}$$

donde μ_{atm} es la admitancia atmosférica que se incrementa con la velocidad del viento y puede ir desde 2000 para un ambiente calmo hasta 10000 J K^{-1} m^{-2} $s^{-0.5}$ para condiciones de mucho viento. Esto implica que un suelo muy seco mostrará relaciones G/H entre 0.5 y 0.1 a medida que aumenta la velocidad del viento.

El régimen térmico del suelo puede ser evaluado usando la Ec. 6.8 que requiere el conocimiento de la amplitud de la temperatura en la superficie del suelo. Usando la ecuación 6.10 podemos escribir:

$$A(0) = \sqrt{\frac{\pi}{2\, P_0}} \frac{\int G\, dt}{\sqrt{k\, C_v}} \tag{6.12}$$

La integral de G durante el día depende de la velocidad del viento (Ec. 6.11) y de la cantidad de energía gastada en evaporación desde el suelo. Para un suelo húmedo, la evaporación puede consumir una gran parte de la radiación neta (pongamos el 70-80%), mientras que para un suelo muy seco la evaporación puede ser insignificante. La Tabla 6.2 muestra un ejemplo de los valores calculados de la amplitud de temperatura de la superficie en suelos arcillosos y arenosos, húmedos o secos, en días despejados de invierno y verano en Córdoba (España). La amplitud es grande cuando el suelo está seco y para condiciones de calma. El suelo arenoso presenta siempre una oscilación mayor que el suelo arcilloso debido a su menor admitancia.

La ecuación 6.12 se puede usar para calcular las temperaturas máximas y mínimas esperadas en el suelo.

Tabla 6.2. Amplitud de la temperatura calculada en la superficie del suelo para días de invierno y verano en suelos arenosos y arcillosos.

Condiciones		Superficie del suelo	Tipo de suelo	G total	Admitancia	Amplitud T
				MJ/m^2	$J/K/m^2/s^{0.5}$	K
Invierno	calma	seco	arenoso	2	870	9.8
	ventoso	seco	arenoso	0.55	870	2.7
	calma	húmedo	arenoso	0.4	1300	1.3
	ventoso	húmedo	arenoso	0.1	1300	0.3
Invierno	calma	seco	arcilloso	2	1200	7.1
	ventoso	seco	arcilloso	0.55	1200	2.0
	calma	húmedo	arcilloso	0.4	1500	1.1
	ventoso	húmedo	arcilloso	0.1	1500	0.3
Verano	calma	seco	arenoso	4.7	870	23.0
	ventoso	seco	arenoso	1.3	870	6.4
	calma	húmedo	arenoso	0.9	1300	3.0
	ventoso	húmedo	arenoso	0.3	1300	1.0
Verano	calma	seco	arcilloso	4.7	1200	16.7
	ventoso	seco	arcilloso	1.3	1200	4.6
	calma	húmedo	arcilloso	0.9	1500	2.6
	ventoso	húmedo	arcilloso	0.3	1500	0.9

BIBLIOGRAFÍA

Campbell GS, Norman JM (1998) An introduction to environmental biophysics. Springer.

Monteith J, Unsworth M (2013) Principles of Environmental Physics: Plants, Animals, and the Atmosphere. Academic Press.

Rosenberg NJ, Blad BL, Verma SB (1983) Microclimate: the Biological Environment. John Wiley and Sons.

Capítulo 7

El balance de energía

F.J. VILLALOBOS
L. TESTI
L. MATEOS
E. FERERES

RESUMEN:

Los principales componentes del balance de energía son la radiación neta, el flujo de calor latente (LE), el flujo de calor sensible (H) y el flujo de calor al suelo (G). Estos se pueden manipular a través de cambios en la radiación neta, LE, H o G. La importancia relativa de los componentes depende principalmente de la disponibilidad de agua para la evaporación. Los casos extremos serán el ambiente húmedo (LE se acerca a R_n) y el ambiente desértico (R_n se reparte entre H y G). El balance energético de la agricultura (energía producida por unidad de energía consumida en todas las operaciones de cultivo) puede ser también analizado en términos de entradas y salidas que se puede estimar mediante la evaluación de la energía incorporada en la cantidad de materiales empleados (fertilizantes, agua, semillas) y en las operaciones realizadas.

7.1. INTRODUCCIÓN

El intercambio de materia y energía entre el cultivo y el medio determina las variaciones de temperatura y humedad del aire y la temperatura del suelo como se ha visto en los capítulos anteriores. La turbulencia facilita el flujo de calor, vapor de agua y dióxido de carbono, que son factores clave en la producción de los cultivos. También afecta al transporte de contaminantes, pesticidas, esporas o polen. La comprensión del reparto de la energía disponible entre los diferentes procesos es necesaria para la manipulación del ambiente aéreo y del suelo, que no sólo afectan a la comunidad de plantas, sino a todo el ecosistema (malezas, insectos, patógenos y otros microorganismos del suelo).

7.2. LA ECUACIÓN DEL BALANCE DE ENERGÍA

De acuerdo con el principio de conservación de la energía, la ecuación del balance de energía de un cultivo se puede escribir como:

$$R_n = H + LE + G + P + S \tag{7.1}$$

donde todos los términos se han definido en los capítulos anteriores excepto P, que representa el flujo de energía consumida en la fotosíntesis, y S, que es el flujo de calor almacenado en la biomasa de los cultivos y el aire circundante. Como se verá más adelante, P es insignificante en comparación con los otros. El almacenamiento (S) puede ser significativo sólo en comunidades de plantas con mucha biomasa (por ejemplo, bosques), pero puede ser ignorado en el caso de los cultivos (Recuadro 7.1). Hay que considerar que en la ecuación 7.1 los flujos se consideran positivos cuando implican una pérdida de energía del cultivo, es decir, cuando se alejan de la cubierta.

Los cambios en la radiación neta pueden llevarse a cabo mediante cambios en las componentes de onda corta u onda larga. El primero puede ser debido a cambios en el flujo entrante usando mallas de sombreo, mediante cambios en la pendiente o la orientación del suelo y también mediante la manipulación del albedo del suelo (acolchado) o las plantas (por ejemplo aplicando caolinita). El balance de radiación de onda larga es generalmente manipulado mediante el bloqueo de las pérdidas con cubiertas de cristal o de plástico o barreras no sólidas (por ejemplo, humo).

El flujo de calor al suelo puede ser modificado por calentamiento artificial o alterando la admitancia térmica mediante la aplicación de riego o la compactación del suelo.

El flujo de calor latente (LE) viene determinado principalmente por la disponibilidad de agua, por lo que la lluvia o el riego afectarán en gran medida los flujos de LE. Si el suelo está mojado, se pueden conseguir reducciones importantes en LE usando coberturas impermeables de plástico (Recuadro 7.2).

La única alternativa para la manipulación del flujo de calor sensible en el campo es el uso de cortavientos para reducir la velocidad del viento. En ambientes controla-

dos (invernaderos) podemos añadir o eliminar calor o aumentar la turbulencia con ventiladores.

Recuadro 7.1. Cálculo de la energía que se gasta en calentar el cultivo

La biomasa máxima de los cultivos anuales no suele superar las 20 t/ha (materia seca).

Asumiendo un contenido de agua de 70 g de agua/100 g de peso fresco (por ejemplo, maíz para ensilado), podemos calcular el término de almacenamiento (S) para un aumento de la temperatura de la cubierta de 20 K en 9 horas. Esto sería indicativo de las condiciones típicas de verano en las latitudes medias.

La masa de agua se puede calcular a partir de biomasa seca (B) como:

$$\text{masa agua} = 20\ \frac{\text{t ms}}{\text{ha}} \text{x}\ \frac{0.7\ \frac{\text{t agua}}{\text{t fresca}}}{(1-0.7)\ \frac{\text{t ms}}{\text{t fresca}}} = 46.67\ \frac{\text{t agua}}{\text{ha}} = 4667\ \frac{\text{g agua}}{\text{m}^2}$$

El calor específico del agua (C_{Mw}) y materia orgánica (C_{MO}) son 4.18 y 1.92 J/g/K, respectivamente.

La cantidad de calor almacenado para un aumento de temperatura de 20 K es:

$$\Delta Q = \Delta T\ (B\ C_{Mo} + m_w C_{Mw}) = 20\ (2000\ 1.92 + 4667\ 4.18) = 466961\ \text{J m}^{-2} = 0.47\ \text{MJ m}^{-2}$$

El flujo medio de calor durante 9 horas se obtiene dividiendo 0.47 10^6 J m^{-2} por la duración (9 x 3600 s) que resulta en 14.4 W m^{-2} que es muy pequeña (alrededor de 2 por ciento) en comparación con valores típicos de la radiación solar en esas condiciones (600-800 W J m^{-2}).

Recuadro 7.2. Análisis del efecto de un plástico negro sobre el balance de energía de un suelo desnudo

La lámina de plástico crea una barrera que suprime la evaporación (LE=0) por lo que toda la energía se gasta en G y H. Se puede esperar una pequeña variación en R_n ya que el albedo se reduce y la pérdida de onda larga puede aumentar cuando el plástico se calienta.

La partición entre H y G dependerá del contacto entre la lámina de plástico y el suelo ya que una capa de aire entre ellos reducirá el flujo de calor hacia el suelo. Por otro lado, la resistencia aerodinámica se reduce ya que el perfil de temperatura sobre el plástico caliente es muy inestable. Por lo tanto, el flujo de calor sensible es mayor.

En resumen, cubriendo el suelo con plástico negro se suprime LE y se reduce la relación G/H, lo que promueve una temperatura más alta del ambiente aéreo.

7.3. IMPORTANCIA RELATIVA DE LOS COMPONENTES DEL BALANCE DE ENERGÍA

Al ser la disponibilidad de agua el principal factor que determina LE, se pueden distinguir dos condiciones extremas:

a) Clima húmedo o zonas bien regadas, donde la disponibilidad de agua no limita la evaporación. La mayor parte de la radiación neta se utiliza en LE. Es el caso de las grandes masas de agua (mares, lagos, embalses), grandes zonas de riego con agua abundante o cualquier área después de precipitaciones generalizadas.

b) Ambientes áridos donde no hay agua disponible: LE es insignificante y, por tanto, la radiación neta se divide solamente en calentar el aire y el suelo.

Un caso especial es el de los oasis, una pequeña zona bien regada en mitad de una zona árida. Aquí el transporte horizontal del calor sensible de la zona árida circundante aumenta la LE en el oasis, por lo que podrá ser superior a R_n. Este proceso de transporte horizontal de energía desde una zona seca a otra húmeda se llama advección.

El balance de energía de los cultivos se encuentra por lo general entre los dos extremos (húmedo-desértico) en función de la disponibilidad de agua y la presencia de vegetación (esta cuestión se examinará con más detalle en el Capítulo 9). Cuatro casos diferentes se analizan a continuación.

La Figura 7.1 representa la evolución diaria de R_n, LE, H y G en un campo de algodón regado medido en Junio de 2003 en Córdoba (España). Este sería un entorno típico bien regado. La radiación neta presenta valores típicos de días despejados en esta época del año en Córdoba. La mayor parte de la energía se gasta en LE que es menor que R_n durante la mañana y más alta durante la tarde (advección). El flujo de calor sensible es pequeño y alcanza su máximo durante la mañana. A partir de las 14:00 el signo de H se invierte, siendo entonces dirigido hacia la superficie. El suelo se calienta durante la mayor parte del día, aunque G es muy pequeño ya que el cultivo cubre el suelo casi por completo. El balance durante 24 horas indica que la radiación neta fue invertida principalmente en la evaporación. En este caso, el calentamiento del aire y el suelo en el período durante el día se compensa por su enfriamiento durante la noche.

El caso de un cultivo con poca disponibilidad de agua se muestra en la Fig. 7.2 para un cultivo de trigo en primavera (alrededor de floración) después de un invierno muy seco en Córdoba (España). El suelo estaba muy seco y, en consecuencia, la transpiración del cultivo fue muy baja. Como resultado, el flujo de calor latente es muy pequeño durante la mayor parte del día, mientras que H y G utilizan la mayoría de la energía durante el día. Para el período de 24 horas, los porcentajes de la energía invertidos en LE, H y G son 12, 78 y 10%, respectivamente.

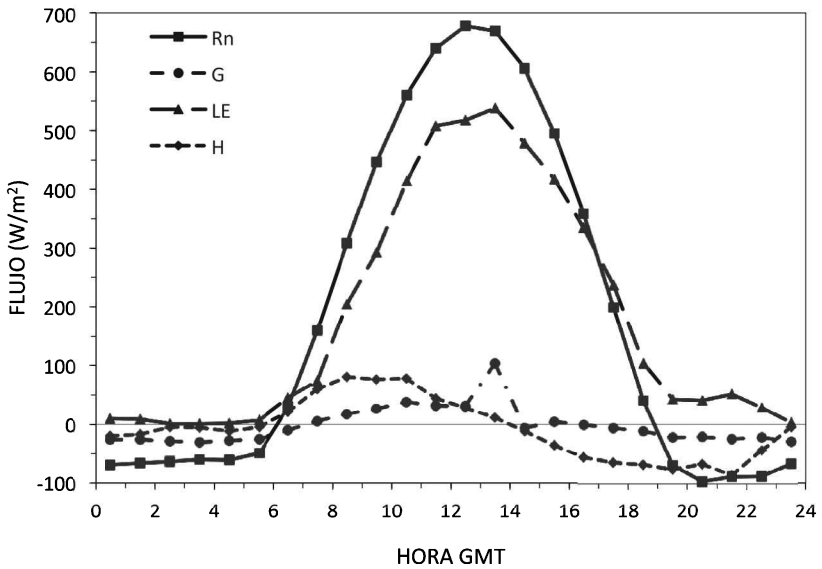


Figura 7.1. Componentes del balance de energía de un cultivo de algodón regado. Córdoba (España). 27 de junio de 2003. Para el período de 24 h los flujos totales fueron R_n = 15.9, G = -0.2, LE = 15.7 y H = -0.6 MJ m^{-2} $día^{-1}$.

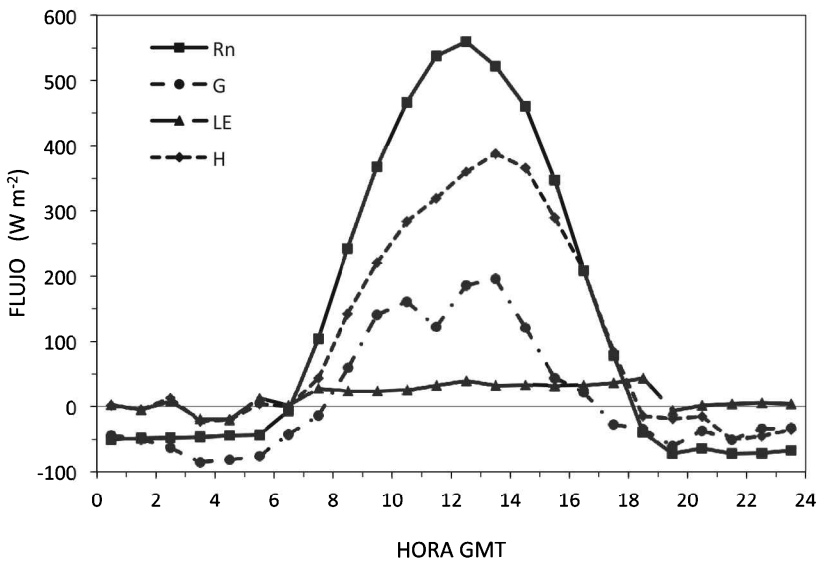


Figura 7.2. Componentes del balance de energía de un cultivo de trigo con déficit hídrico severo. Córdoba (España). 19 de abril de 1999. Para el período de 24 h los flujos totales fueron de R_n = 11.6, G = 1.2, LE = 1.4 y H = 9 MJ m^{-2} $día^{-1}$.

En contraste con el cultivo bien regado el caso de un rastrojo de trigo se muestra en la Figura 7.3. Alrededor de la fecha de medición (17 de Junio), ocurre el máximo de radiación solar extraterrestre en el hemisferio norte. Sin embargo, la R_n máxima es ligeramente menor que en el caso de la Fig. 7.1, lo que se explica por el alto albedo de rastrojos y la paja que cubre el suelo. La disponibilidad de agua en este caso es nula (el cultivo había extraído toda el agua del suelo) lo que explica la ausencia de LE. El flujo de calor sensible es paralelo a R_n a lo largo del día, alcanzando el máximo alrededor del mediodía. El flujo de calor al suelo es ahora mayor que para algodón y disminuye durante la tarde. Teniendo en cuenta el periodo de 24 h, 90% de la energía se gasta en el calentamiento del aire y 10% en calentar el suelo. Hay que tener en cuenta que la paja y el rastrojo que cubren el suelo sirven como aislamiento térmico.

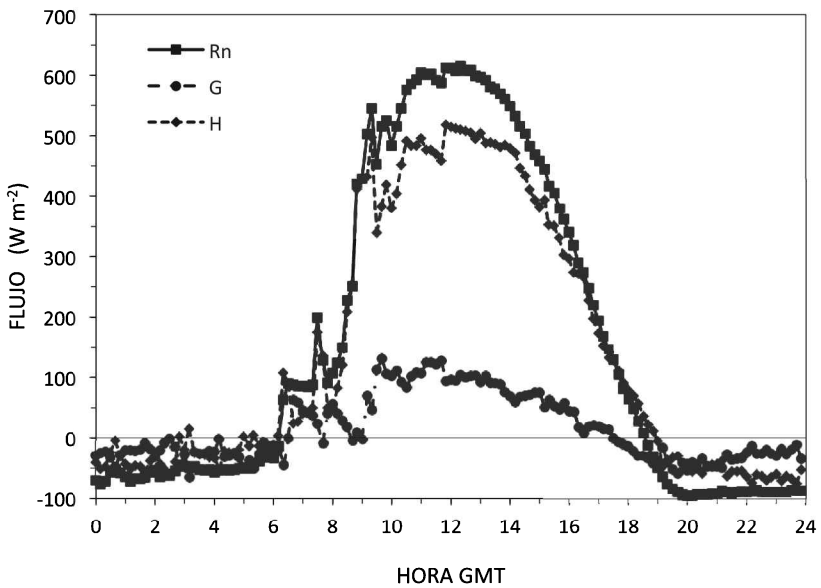


Figura 7.3. Componentes del balance de energía sobre rastrojo de trigo. Córdoba (España). 17 de junio de 1995. Para el periodo de 24 h los flujos totales fueron R_n = 13.7, G = 1.3 y H = 12.4 MJ m^{-2} $día^{-1}$.

Finalmente, la figura 7.4 presenta un caso intermedio entre los casos húmedo y seco. Es un olivar con riego por goteo en Córdoba, en el que los árboles presentan una cobertura parcial del suelo. En el momento de las medidas los árboles cubrían el 40% del terreno y la superficie del suelo estaba seca. Durante el día, los tres flujos (LE, H y G) son importantes, pero predomina LE (Fig. 7.4). El flujo H alcanza su máximo a mediodía y por la noche es pequeño. G presenta un patrón similar a los casos anteriores: el máximo se produce al mediodía, porque en ese momento el porcentaje de suelo expuesto a la radiación directa es máximo. Para el período de 24 horas, los porcentajes de la energía invertidos en LE y H son 79 y 21%, respectivamente, mientras que G es prácticamente cero.

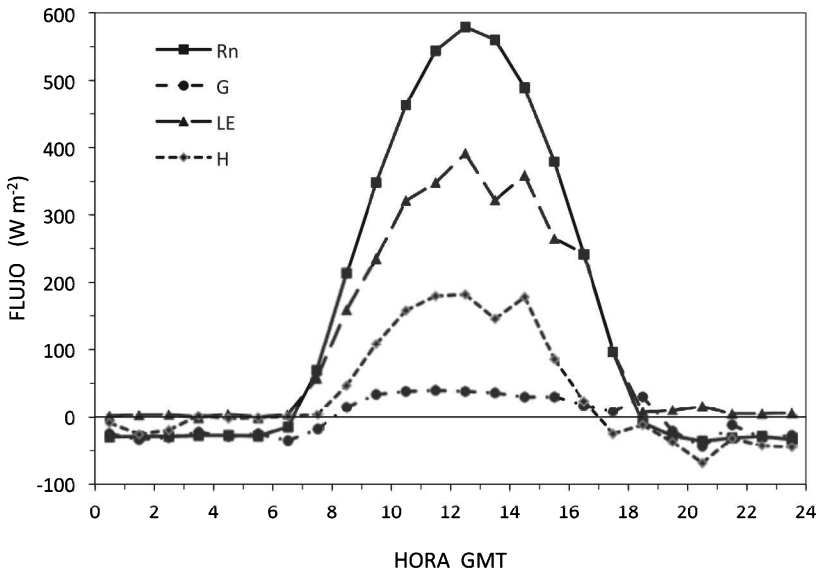


Figura 7.4. Componentes del balance de energía en un olivar. Centro de Investigación Agrícola de Córdoba (España). 8 de septiembre de 1997. Para el período de 24 h los flujos totales fueron de R_n = 13.1, G = -0.1, LE = 10.3 y H = 2.9 MJ m^{-2} $día^{-1}$.

Hemos visto que la importancia relativa de los componentes del balance de energía varía a lo largo del día y que cuando se suman para períodos de 24 h, G suele ser pequeña en comparación con H y LE, cuyas magnitudes relativas dependerán de la disponibilidad de agua (o presencia de la vegetación) en la superficie del suelo. El impacto de los flujos en las oscilaciones de la temperatura del aire y del suelo depende del valor absoluto de H y G. La diferencia entre temperatura máxima y mínima será mayor cuando los flujos positivos sean más altos y los flujos negativos sean más bajos.

El reparto de la energía para períodos anuales también se rige por la disponibilidad de agua. La Tabla 7.1 muestra los valores de la energía disponible en los diferentes niveles y las pérdidas (partición) de la energía en cada etapa para un olivar de regadío con cobertura del suelo del 40% en Córdoba (España). A partir de una radiación solar incidente de alrededor de 6000 MJ m^{-2}, la energía producida por el cultivo en forma de aceite es equivalente a 7 MJ m^{-2} como aceite (2000 Kg aceite/ ha^{-1}. Alrededor del 50% de la radiación entrante se pierde por la reflexión y emisión de radiación de onda larga. A continuación, la radiación neta se gasta en evaporación (56%), en calentamiento de la atmósfera (40%) y en fotosíntesis (sólo 4%). Téngase en cuenta que el componente de calentamiento del suelo es cero para los períodos anuales, siempre y cuando la temperatura media del suelo no cambie a largo plazo. Alrededor del 50% de la energía captada por la fotosíntesis se pierde como respiración, dejando el otro 50% fijado en la biomasa del árbol (ramos, ramas, raíces y frutos). Sólo se cosecha el 60% de la ener-

gía fijada. Después de la extracción del aceite, la energía captada es sólo 7 MJ m^{-2}. Esta baja eficiencia aparente no tiene en cuenta otros insumos energéticos necesarios para la producción del olivar (maquinaria, fertilizantes, bombeo de agua de riego). En la misma zona, una rotación intensiva de regadío de trigo-maíz en aproximadamente el mismo período (como doble cultivo, el maíz sembrado después de cosechar el trigo) podría producir hasta 19000 kg/ha de grano total, lo que sería equivalente a alrededor 26 MJ m^{-2} , siendo también una pequeña fracción de la radiación solar incidente de 6000 MJ m^{-2}.

Tabla 7.1. Energía disponible anual (MJ m^{-2}) en diferentes niveles y pérdidas (partición) de la energía en cada etapa para un olivar de regadío con cobertura del suelo del 40% en Córdoba (España).

	Energía disponible	Pérdidas	
	MJ m^{-2}	MJ m^{-2}	
		reflexión	emisión
Radiación solar	5975	1100	2065
		LE	H
Radiación neta	2810	1570	1124
		Respiración	
Fotosíntesis	40	20	
		Vegetativo	
Energía fijada	20	8	
		Residuos	
Energía obtenida	12	5	
Energía en aceite	7		

7.4. LOS REQUERIMIENTOS DE ENERGÍA EN LA AGRICULTURA

El balance de energía de un campo puede ser también analizado en relación con los requerimientos de energía asociados a las diferentes prácticas agrícolas y a la energía final almacenada en los productos vegetales. Los requerimientos de energía pueden ser directos (combustible utilizado, energía gastada en el bombeo de agua) o indirecta (energía gastada en la producción de insumos, maquinaria o equipo). Cada categoría puede ser también dividida en un componente variable (siendo proporcional al nivel de insumos) y un componente fijo (no depende del nivel de insumos). Por lo tanto:

$$E_{req} = E_{dir\ fix} + E_{dir\ var} + E_{ind\ fix} + E_{ind\ var} \quad (7.2)$$

La Tabla 7.2 resume los tipos de insumos energéticos asociados a las diferentes operaciones de la explotación. Por ejemplo, la aplicación de un pesticida requiere una entrada directa fija de energía para hacer funcionar el tractor, una entrada indirecta fija asociada a la fabricación y al mantenimiento del tractor y la maquinaria y una entrada indirecta variable, el de la fabricación del pesticida, que depende de la dosis aplicada.

Tabla 7.2. Clasificación de los tipos de requerimientos de energía para las operaciones agrícolas.

Operación	Directa		Indirecta	
	Fija	Variable	Fija	Variable
Siembra	Combustible		Máquina, tractor	Semillas, plaguicidas, fertilizantes
Laboreo	Combustible		Aperos, tractor	
Riego		Combustible o energía eléctrica para el bombeo	Sistema de riego	Desalinización, transporte
Aplicación de plaguicidas	Combustible		Máquina, tractor	Pesticida
Cosecha	Combustible		Cosechadora	
Procesado cosecha		Combustible o energía eléctrica	Máquina	

La Tabla 7.3 muestra algunos coeficientes de energía que son útiles para el cálculo de las necesidades energéticas de la explotación. En la Tabla 7.4 se dan valores representativos para las diferentes operaciones que incluyen tanto los requerimientos energéticos directos e indirectos. Los valores reales para labores específicas se discuten con más detalle en el Capítulo 17.

Tabla 7.3. Coeficientes energéticos para diferentes insumos utilizados en la producción de cultivos.

Entrada	Observaciones	Coeficiente de energía	Unidades
Mano de obra	Energía incorporada	100-1000	MJ/día/persona
Gasolina	Contenido energético	38	MJ/L
Diesel	Contenido energético	39	MJ/L

Etanol	Contenido energético	22	MJ/L
Carbón	Contenido energético	17-30	MJ/kg
Madera	Contenido energético	18-23	MJ/kg
Tractores	Fabricación y transporte	87	MJ/kg
Implementos	Fabricación y transporte	70	MJ/kg
Pesticidas	Fabricación y transporte	358	MJ/kg
Fertilizantes nitrogenados	Fabricación y transporte	77	MJ/kg N
Fertilizantes P	Fabricación y transporte	37	MJ/kg P
Fertilizantes K	Fabricación y transporte	17	MJ/kg K
Amoniaco anhidro	Fabricación y transporte	60	MJ/kg N
Nitrato de amonio	Fabricación y transporte	85	MJ/kg N
Urea (sólido)	Fabricación y transporte	80	MJ/kg N
Secado de granos		6.4-10	MJ/kg de agua
Transporte	En camión	6.3	MJ/t/km
Agua	Desalinización de agua de mar	9.0-13.0	MJ/m^3
Agua	Desalinización de agua salobre	3.6-10	MJ/m^3
Laboreo primario	Total	1200	MJ/ha
Laboreo secundario	Total	300	MJ/ha
Aplicación pesticida	Total (excluyendo el pesticida)	90	MJ/ha
Aplicación fertilizantes	Total (excluyendo fertilizantes)	90	MJ/ha
Siembra	Total (excluidas las semillas)	340	MJ/ha
Cosecha de cereales y leguminosas	Total	1200	MJ/ha
Cosecha de tubérculos y raíces	Total	2200	MJ/ha

Tabla 7.4. Requerimientos de energía de diferentes operaciones agrícolas. Estos valores incluyen los requerimientos energéticos directos e indirectos y son sólo indicativos del orden de magnitud.

Operación	Energía total (excluyendo la mano de obra)
	MJ/ha
Laboreo primario	1200
Laboreo secundario	300
Aplicación pesticida	90
Aplicación fertilizantes	90
Siembra	340
Cosecha de cereales y leguminosas	1200
Cosecha de tubérculos y raíces	2200

El requerimiento de energía (MJ ha^{-1} $año^{-1}$) para el riego se puede calcular como:

$$E_{irrig} = \rho_{water}\, g\, 10^{-6} \frac{I}{\mu_p\, \mu_m} \left(H_{lift} + 1.2\, H_{op}\right) + E_{ind\ fix} + E_{ind\ var} \tag{7.3}$$

donde:

ρ_{water} : densidad del agua (10^3 kg m^{-3})

g: aceleración de la gravedad (9.81 m s^{-2})

10^{-6} se utiliza para convertir de J a MJ

I: riego aplicado estacional (m^3 ha^{-1} $año^{-1}$)

μ_p: eficiencia de la bomba (típicamente entre 0.6 y 0.8)

μ_m: eficiencia del motor, que podemos suponer 0.4 para diesel y 0.9 para motores eléctricos

H_{lift}: energía necesaria para elevar el agua desde la fuente de agua (m). Es aproximadamente igual a la profundidad del nivel freático para aguas subterráneas y despreciable para las fuentes de agua superficiales.

H_{op}: presión de funcionamiento del sistema de riego (m). Podemos utilizar valores típicos de 10-25 m para goteo y 30-40 m para aspersión. El coeficiente de 1.2 se basa en el supuesto de que se requiere un 20% de energía adicional para mantener la presión suficiente en toda la red.

$E_{ind\ fix}$: energía gastada en la fabricación e instalación del sistema de riego dividida por su vida útil. Podemos utilizar los valores de 7000-9000 MJ ha^{-1} $año^{-1}$ para aspersión y 13000 MJ ha^{-1} $año^{-1}$ para riego por goteo. Para el riego de superficie hay que añadir aquí la energía necesaria para la nivelación de terrenos y para formar los surcos.

$E_{ind\ var}$: energía gastada en la desalación (si es necesaria) y en el transporte de agua hasta la explotación, que es proporcional a la cantidad de riego aplicada:

$$E_{ind\ var} = c_w\, I \tag{7.4}$$

donde c_w es la energía gastada por unidad de volumen de agua. Por lo tanto, podemos calcular la energía necesaria para el riego como la suma de dos términos, uno variable y uno fijo:

$$E_{irrig} = \left(\frac{H_{lift} + 1.2\, H_{op}}{102\, \mu_p\, \mu_m} + c_w\right) I + E_{ind\ fix} \tag{7.5}$$

El requerimiento de energía de la aplicación de fertilizantes (MJ ha^{-1} $año^{-1}$) se calcula como:

$$E_{fert} = n_f\, A + N_a c_N + P_a c_P + K_a c_K + E_{ind} \tag{7.6}$$

donde

n_f: número de aplicaciones de fertilizantes

A: es el consumo de energía como combustible en cada aplicación (MJ ha^{-1})

N_a, P_a, K_a: cantidades aplicadas de N, P y K (kg ha^{-1} $año^{-1}$)

c_N, c_P, c_K: energía necesaria para la producción y transporte de los fertilizantes (MJ/kg N, MJ/kg P, MJ/kg K)

E_{ind}; energía gastada en la fabricación, reparación y mantenimiento de la abonadora o inyector dividida por su vida útil.

La energía gastada en mano de obra no es fácil de calcular. Un ser humano promedio necesita entre 10 y 15 MJ/día de energía en forma de alimentos, pero tenemos que añadir la energía necesaria para otras actividades de los seres humanos que depende en gran medida de los niveles de vida, por lo que podemos llegar a una amplia gama de valores de la llamada energía incorporada (100-1000 MJ $día^{-1}$ $persona^{-1}$). A efectos de cálculo, podemos tomar el valor mínimo cuando casi todas las operaciones se realizan con mano de obra y el máximo cuando se utilizan máquinas para todas las operaciones.

Ejemplo 7.1.

Las necesidades medias de mano de obra para la cosecha manual de trigo (rendimiento de 6 t/ha) es alrededor de 1000 horas/ha, mientras que el uso de maquinaria la reduce a 2 horas/ha. Suponiendo días de trabajo de 8 horas, las necesidades energéticas de la cosecha manual son 12500 MJ/ha. Si usamos una cosechadora, los requerimientos de energía sería la suma de un componente humano (2 horas/8 horas/día x 1000 MJ/día/persona y un componente de la máquina (1200 MJ/ha, Tabla 7.3), lo que da 1450 MJ/ha. No es sorprendente que la demanda de energía de la cosecha manual sea más alta ya que los seres humanos no son tan eficientes como las máquinas para realizar trabajo físico.

7.5. SALIDAS DE ENERGÍA DE LA EXPLOTACIÓN Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

Las salidas de energía de una explotación se pueden calcular de acuerdo con diferentes criterios. Por lo general, consideramos sólo la energía contenida en todas las materias exportadas desde la explotación, por lo que no se tiene en cuenta el contenido energético de los residuos de cosecha (a menos que se vendan para alimentación de ganado fuera de la finca) ni tampoco la energía almacenada en la materia orgánica del suelo. Por otro lado, el contenido de energía de un material dado varía de acuerdo con el uso de la energía. Nosotros usamos los valores de energía bruta que están cerca de la energía de combustión del material. La Tabla 7.5 muestra los valores típicos de energía bruta en los productos vegetales y residuos de cultivos. Además de la composición de la materia seca, un factor importante en la evaluación del contenido de energía de la biomasa es su contenido de agua. El valor calorífico (HV, MJ/kg de biomasa fresca) se calcula como:

$$HV = (1 - w)HCB - 2.45\, w \tag{7.7}$$

donde w es el contenido de agua de la biomasa (g de agua/g de biomasa fresca).

Tabla 7.5. Contenido energético de los productos agrícolas y los residuos. Las especies se han agrupado siempre que sea posible: cereales (trigo, cebada, centeno, maíz, mijo, sorgo, arroz, triticale), cereales forrajeros (maíz, sorgo), leguminosas grano (judía, caupí, haba, lenteja, guisante, cacahuete, garbanzo), leguminosas forrajeras (trébol, alfalfa), oleaginosas (girasol, colza, girasol, lino), raíces y tubérculos (patata, yuca, ñame, batata). La producción total de energía será el producto del rendimiento y el contenido energético del producto cosechado.

Cultivo	Uso	Contenido de energía (MJ/kg MS)	
		Producto cosechado	residuos
Cereales	grano	18-19	15.5-18.5
	forraje	18-19	

Leguminosas	semilla	19-20	18-19
	forraje	18-19	
Soja	semilla	23.6	19
Algodón	Semilla+fibra	23.8	19
Oleaginosas	semilla	26-29	18.3-18.8
Remolacha azucarera	Raíz sin corona	17	16.7
Raíces y tubérculos	tubérculos, raíces	17	18-20

Ejemplo 7.1.

Se cultiva trigo de secano como monocultivo en una explotación con un rendimiento (materia seca) de 2500 kg de grano/ha y 3750 kg de paja/ha. Las necesidades totales de energía son 14779 MJ/ha (3400 para labores, 9613 para fertilizantes y 1050 y 716 para semillas y pesticidas, respectivamente). Si tanto el grano como la paja se exportan, la salida es 110000 MJ/ha y la relación salida/entrada es 7.4. Si sólo se exporta el grano la relación salida/entrada es 3.1. En ambos casos, el balance de energía de la producción agrícola es positivo (se produce más energía que la consumida).

BIBLIOGRAFÍA

Connor DJ, Loomis RS, Cassman KG (2011) Crop ecology: productivity and management in agricultural systems. 2nd ed. Cambridge University Press

Monteith J, Unsworth M (2013) Principles of Environmental Physics: Plants, Animals, and the Atmosphere. Academic Press

Rosenberg NJ, Blad BL, Verma SB (1983) Microclimate: the Biological Environment. John Wiley and Sons

Capítulo 8

El balance de agua

F.J. VILLALOBOS
L. MATEOS
F. ORGAZ
E. FERERES

RESUMEN:

Los componentes del balance de agua (infiltración, percolación profunda, evaporación desde la superficie del suelo, etc.) determinan la cantidad de agua disponible para el cultivo. El flujo de agua en el suelo se produce siguiendo el gradiente del potencial de agua y puede ser analizado mediante la ecuación de Richards, pero hay metodologías alternativas más simples para cuantificar los componentes del balance hídrico. La percolación profunda puede ser estimada en base a las propiedades del suelo y al contenido de agua por encima de la capacidad de campo, dependiendo también de la evaporación del suelo y de la transpiración. La escorrentía superficial se calcula en función del número de curva y de la cantidad de precipitación. Para valores mensuales, la lluvia efectiva se puede calcular por los métodos de la FAO y el USDA.

8.1. INTRODUCCIÓN

El funcionamiento de los ecosistemas terrestres depende en gran medida de las entradas y salidas de agua, que determinan la cantidad y calidad del agua disponible para la vida en la Tierra. La disponibilidad de agua se considera el principal factor limitante de la productividad de los sistemas agrícolas. De todos los usos del agua captada por el hombre, la agricultura es el principal consumidor de agua: en promedio consume dos tercios del total a nivel mundial, y en la mayoría de países con riego en zonas áridas consume más del 80% del agua. Por lo tanto, es esencial entender y cuantificar la dinámica de los flujos de entrada y salida de agua del sistema agrícola, es decir, calcular los componentes del balance de agua que determinan la disponibilidad de agua para los cultivos y, en su caso, para cuantificar las necesidades de riego.

Como se describe en el Capítulo 2, los suelos se componen de sólidos, líquidos y gases, con fracciones típicas de 45-50% de material mineral, 0-5% de materia orgánica, y 50% de espacio poroso que permite el flujo de agua y gases. La porosidad (fracción de volumen de espacio de los poros) se determina por la disposición de las partículas del suelo, siendo baja cuando las partículas del suelo están muy próximas (por ejemplo, en suelo compactado) y mayor cuando los suelos tienen un alto contenido de materia orgánica. Los valores típicos de porosidad están en el rango 0.35-0.50 en suelos arenosos y 0.40-0.60 en suelos de textura franca a arcillosa. La porosidad por lo general disminuye con la profundidad del suelo debido a que el subsuelo tiende a encontrarse más compactado que la capa superior. La densidad aparente del suelo (ρ_b) es una medida de la masa de suelo por unidad de volumen (sólidos+espacio poroso) y se expresa usando la masa secada en estufa (Capítulo 2).

8.2. EL ESTADO DEL AGUA EN EL SUELO: CONTENIDO DE AGUA Y POTENCIAL HÍDRICO

El contenido de agua del suelo puede ser expresado en términos de volumen (θ_v = volumen de agua/volumen de suelo) o de masas (gravimétrico, θ_g = masa de agua/masa de suelo seco). Ambas medidas se relacionan a través de la densidad aparente del suelo de manera que $\theta_v = \rho_b\, \theta_g$. La cantidad de agua (expresada en mm) en una profundidad Z de suelo (mm), es decir, el agua total almacenada (TSW, mm) será:

$$TSW = (1 - F_{VC})\, Z \cdot \theta \tag{8.1}$$

donde F_{VC} es la fracción de volumen de elementos gruesos (partículas de suelo superiores a 2 mm de diámetro) que se puede estimar como una función de la fracción de masa de elementos gruesos (F_{MC}) como:

$$F_{VC} = \frac{F_{MC}\rho_b}{2.65 - F_{MC}\,(2.65 - \rho_b)} \tag{8.2}$$

donde ρ_b tiene unidades de t m^{-3} y se calcula sin elementos gruesos. Nótese que 2.65 t m^{-3} es la densidad media de los elementos gruesos en los suelos.

Ejemplo 7.1.

Un suelo de 1 m de profundidad tiene un 30% de elementos gruesos (en términos de masa) y una densidad aparente de 1.4 t m^{-3}. Si el contenido de agua es 0.2 m^3 m^{-3}:

$$F_{VC} = \frac{F_{MC}\rho_b}{2.65 - F_{MC}(2.65 - \rho_b)} = \frac{0.3 \cdot 1.4}{2.65 - 0.3(2.65 - 1.4)} = 0.18\, m^3 m^{-3}$$

$$TSW = (1 - F_{VC})\, Z \cdot \theta = (1 - 0.18)\, 1000 \cdot 0.20 = 164 \text{ mm}$$

El agua es retenida en la matriz de partículas de suelo por adsorción y se mueve en los poros por capilaridad. El agua está siempre en movimiento aunque muy lentamente cuando el suelo está seco y por lo tanto se puede considerar retenida por el suelo para muchos propósitos prácticos. Hay tres valores de contenido de agua que caracterizan a la capacidad de retención de agua del suelo:

- Punto de marchitez permanente (PMP, también llamado Límite inferior) (θ_{PWP}) el contenido de agua del suelo por debajo del cual las raíces de las plantas no son capaces de extraer agua.
- Capacidad de campo (también llamado límite superior drenado) (θ_{FC}) es el valor en el que el contenido de agua del suelo se estabilizará después de drenar (el drenaje continúa pero a un ritmo que puede considerarse despreciable).
- Saturación (θ_{SAT}). Este es el contenido máximo de agua que se puede observar en el suelo y es en promedio el 85% de la porosidad (η). Como la densidad media de la fracción sólida del suelo es 2.65 t m^{-3} podemos calcular la porosidad como una función de la densidad aparente: $\eta = 1 - \rho_b / 2.65$.

El estado del agua en el suelo puede ser caracterizado como una función de su potencial (Ψ), que es la energía potencial por unidad de masa o volumen y tiene unidades de presión (1 J/kg = 1 kPa ≈ 0.1 m de columna de agua). El potencial hídrico del suelo es la suma de cuatro componentes:

- Potencial de presión (Ψ_p) que es la presión ejercida por la columna de agua por encima del punto considerado. En un suelo no saturado $\Psi_p = 0$.
- Potencial gravitatorio (Ψ_g) es la energía potencial del agua debido a su posición en un campo gravitatorio. Se calcula como g h donde g es la aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2) y h es la altura por encima del plano de referencia arbitrario.
- Potencial mátrico (Ψ_m): es el causado por la atracción de la matriz del suelo y las moléculas de agua. La relación entre el contenido de agua del suelo y el potencial matricial, $\Psi_m = f(\theta_v)$ se denomina curva característica (Fig. 8.1). El potencial ma-

tricial es cero en suelo saturado y se vuelve más negativo conforme el suelo se seca. Campbell ha propuesto la siguiente ecuación para calcular la curva característica de agua del suelo:

$$\Psi_m = \Psi_e \left(\frac{\theta_v}{\theta_{SAT}}\right)^{-b} \tag{8.3}$$

donde Ψ_e es el llamado potencial de entrada de aire, b es un parámetro empírico y θ_{SAT} es el contenido de agua en saturación. Los valores de Ψ_e y b para diferentes texturas de suelo se presentan en la Tabla 8.1.

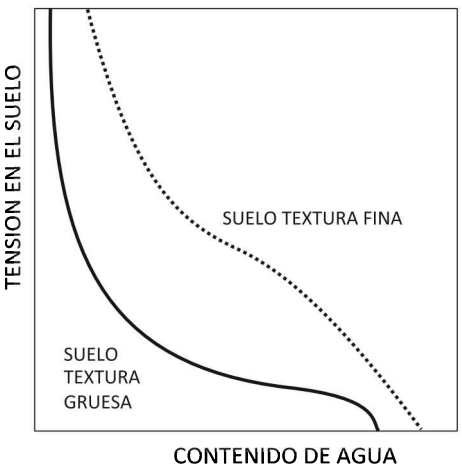


Figura 8.1. Curvas características para un suelo de textura gruesa y uno de textura fina.

Tabla 8.1. Propiedades físicas típicas de suelos de diferente textura.

Textura	limo	arcilla	Ψe	b	K_s	Densidad aparente	porosidad	θ_{PWP}	θ_{FC}	θ_{SAT}
	fracción		J/kg		x 10^{-6} kg s m^{-3}	t/m^3	fracción	m^3/m^3		
Arena	0.05	0.03	-0.7	1.7	5800	1.68	0.37	0.03	0.09	0.23
Arenoso franco	0.12	0.07	-0.9	2.1	1700	1.64	0.38	0.06	0.13	0.26
Franco arenoso	0.25	0.1	-1.5	3.1	720	1.56	0.41	0.1	0.21	0.31
Franco	0.4	0.18	-1.1	4.5	370	1.43	0.46	0.12	0.27	0.37
Franco limoso	0.65	0.15	-2.1	4.7	190	1.41	0.47	0.13	0.33	0.40
Franco arcillo arenoso	0.13	0.27	-2.8	4	120	1.4	0.47	0.15	0.26	0.37

Franco arcilloso	0.34	0.34	-2.6	5.2	64	1.31	0.51	0.2	0.32	0.41
Franco limoso arcilloso	0.58	0.33	-3.3	6.6	42	1.27	0.52	0.32	0.37	0.45
Arcilla arenosa	0.07	0.4	-2.9	6	33	1.33	0.50	0.24	0.34	0.42
Limoso arcilloso	0.45	0.45	-3.4	7.9	25	1.23	0.54	0.25	0.39	0.46
Arcilla	0.2	0.6	-3.7	7.6	17	1.21	0.54	0.27	0.4	0.47

- Potencial osmótico (Ψ_o): se debe a la presencia de sales en la solución del suelo. Este potencial es cero para el agua pura y se hace más negativo conforme aumenta la concentración de sales. Una relación aproximada entre Ψ_o (kPa) y la concentración de sal (C_s, g m^{-3}) es:

$$\Psi_o = -0.05625\ C_s \qquad (8.4)$$

Ejemplo 7.1.

La curva característica de un suelo franco arenoso viene dada por

$$\Psi_m = -0.152\ \theta^{-3.1}\ (\text{kPa})$$

Vamos a calcular el potencial de agua para este suelo a 1 m de profundidad si el contenido de agua es de 0.2 m^3m^{-3} y la concentración de sal en la solución del suelo es de 64 g/m^3. Fijamos el nivel de referencia en la superficie del suelo. Por lo tanto:

$$\Psi = \Psi_m + \Psi_g + \Psi_o = -0.152 \cdot 0.2^{-3.1} - 9.81 \text{ x } 1 - 0.05625 \text{ x } 64 = -22.3 - 9.8 - 3.6 = -35.7 \text{ kPa}$$

Que es equivalente a -0.036 Mpa o -0.36 bar.

Ejemplo 7.1.

Una capa freática se encuentra a una profundidad de 1 m en el suelo del ejemplo 8.2. ¿Cuál sería el contenido de agua en la superficie del suelo en condiciones de equilibrio hidráulico si el potencial osmótico no cambia con la profundidad?

Si tomamos la superficie del suelo como nivel de referencia, el potencial de agua en la capa freática será:

$$\Psi = \Psi_m + \Psi_g + \Psi_o = 0 - 1 \text{ x } 9.81 + \Psi_o = -9.81 + \Psi_o (\text{kPa})$$

El potencial de agua en la superficie del suelo tendrá el mismo valor. Si el potencial osmótico es igual en el nivel de referencia y en la capa freática, el potencial matricial en la superficie será:

$$\Psi_m = -9.81 + \Psi_{o\ \text{capa frea.}} - \Psi_o = -9.81 \text{ kPa}$$

De acuerdo con la curva característica:

$\Psi_m = -0.152\ \theta^{-3.1}$

$$\theta = -\left(\frac{0.152}{\Psi_m}\right)^{1/3.1} = \left(\frac{0.152}{-9.81}\right)^{1/3.1} = 0.26\ m^3 m^{-3}$$

8.3. FLUJO DE AGUA EN EL SUELO

En el caso más simple consideramos un flujo unidimensional de agua (vertical) en el suelo que obedece a la ley de Darcy:

$$J_w = -K(\Psi_m)\frac{d\,\Psi}{dz} \tag{8.5}$$

donde $K(\Psi_m)$ es la conductividad hidráulica que es una función del potencial matricial y J es el flujo de agua (kg/m²/s). En saturación (potencial matricial cero) K alcanza su valor máximo y se llama conductividad hidráulica en saturación (K_s). Los componentes del potencial de agua a considerar son los potenciales matricial y gravitatorio. Entonces, la ecuación anterior es equivalente a:

$$J_w = -K(\Psi_m)\frac{d\Psi_m}{dz} - K(\Psi_m)\frac{d\Psi_g}{dz} = -K(\Psi_m)\left(\frac{d\Psi_m}{dz} + g\right) \tag{8.6}$$

La conductividad hidráulica se puede calcular como:

$$K(\theta) = K_s\left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^{2b+3} \tag{8.7}$$

o

$$K(\Psi_m) = K_s\left(\frac{\Psi_e}{\Psi_m}\right)^{2+3/b} \tag{8.8}$$

Donde los parámetros ya han sido definidos y se muestran en la Tabla 8.1.

8.4. EL BALANCE DE AGUA

La Figura 8.2 muestra un diagrama esquemático del balance de agua de un campo. Podemos escribir la ecuación de conservación de masa para las entradas y salidas de agua de ese campo durante un período para calcular el incremento en el contenido total de agua del suelo en la zona radicular del cultivo (TSWC):

$$\Delta\ \mathrm{TSWC} = \mathrm{P} + \mathrm{I} - \mathrm{E_s} - \mathrm{E_p} - \mathrm{SR} - \mathrm{DP} + \mathrm{WTC} \tag{8.9}$$

donde P es la precipitación, I es el riego aplicado, E_s es la evaporación desde la superficie del suelo, E_p es la transpiración, SR es la escorrentía superficial, es decir, el agua no infiltrada, DP es la percolación profunda y WTC es el flujo de agua que asciende desde la capa freática. Para planificar el riego es mejor expresar la cantidad de agua en el suelo como un déficit (déficit de agua del suelo, SWD), que es la cantidad de agua necesaria para llevar el suelo a FC o el límite superior (Capítulo 20).

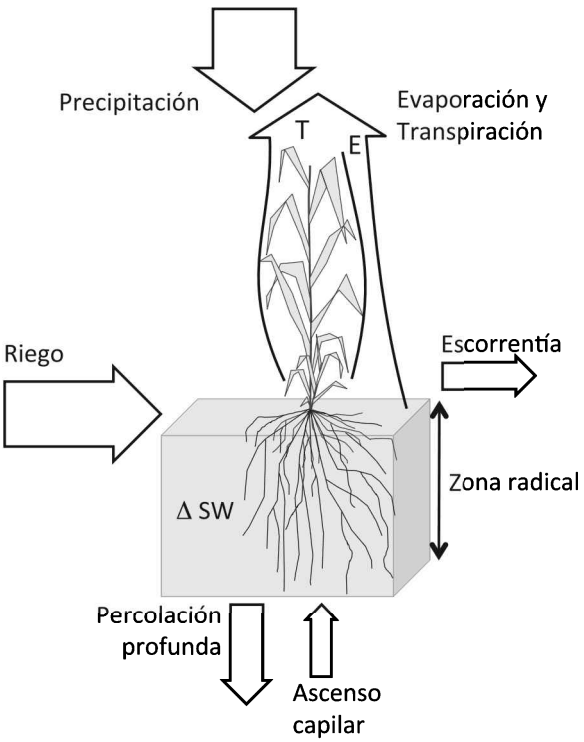


Figura 8.2. Diagrama de los componentes del balance de agua de un campo

El balance de agua se puede calcular para diferentes períodos de tiempo (horas, días, decenas, meses). Nos centraremos en primer lugar en varios métodos para el cálculo de valores diarios.

8.5. INFILTRACIÓN

La velocidad a la cual el agua entra en el suelo a través de su superficie (tasa de infiltración) se reduce con el tiempo, hasta que se alcanza un valor relativamente constante, que depende del suelo (Figura 8.3), siendo mayor para suelos arenosos y menor para suelos arcillosos. La tasa de infiltración inicial es inversamente proporcional al contenido de agua inicial. Esto se debe a que el gradiente de potencial

de agua entre el agua y el suelo es mayor si este último está más seco (ya que el potencial matricial es más negativo). El agua que no se infiltra, se queda en la superficie y escurre hacia las zonas más bajas y sale del campo. En el apartado 8.7 se mostrará una metodología para evaluar la cantidad de escorrentía.

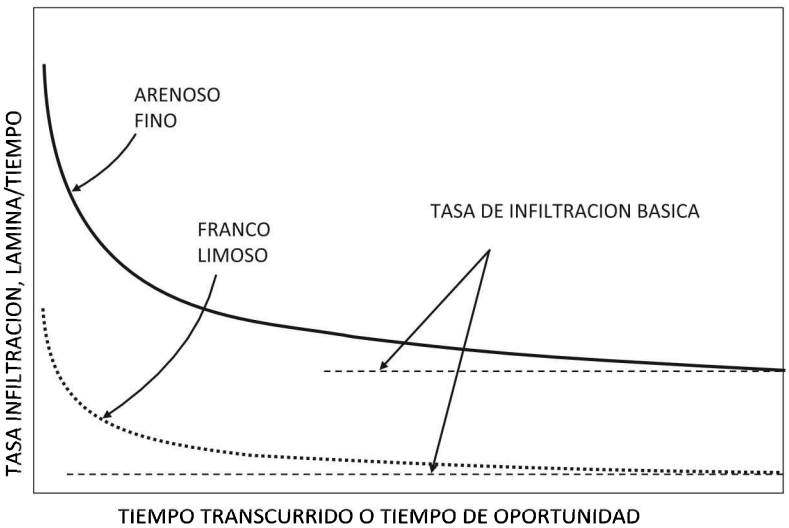


Figura 8.3. Tasa de infiltración para dos suelos que difieren en conductividad hidráulica en saturación.

8.6. PERCOLACIÓN PROFUNDA

Existen diferentes enfoques para calcular la cantidad de agua que sale por debajo de la zona radical del cultivo. El método presentado aquí requiere el conocimiento de los valores de profundidad del suelo (Z, mm), y los valores del contenido de agua del suelo en capacidad de campo y en saturación. Adicionalmente se requiere un parámetro adimensional (SWCON), que es la fracción de agua que se pierde por percolación en un día en relación con la cantidad de agua del suelo que excede a la capacidad de campo. La cantidad de agua que excede el contenido de agua de saturación se considera que se pierde instantáneamente por percolación profunda.

Supongamos que en un día determinado una cantidad de agua P_I (mm) se ha infiltrado en el suelo. La cantidad de agua que se puede almacenar a corto plazo (SWCC) se puede calcular como:

$$SWCC = (\theta_{SAT} - \theta)\, Z \tag{8.10}$$

siendo θ el contenido medio de agua en el suelo. Si P_I es mayor que SWCC, el exceso se pierde por percolación profunda en el mismo día. Si el contenido de agua, después de añadir el agua infiltrada, no supera la capacidad de campo, entonces

se asume que no hay percolación. Si el contenido de agua está entre capacidad de campo y saturación, la percolación se calcula como:

$$DP = SWCON\ Z\ (\theta - \theta_{FC}) \tag{8.11}$$

En algunos modelos de este tipo se asume SWCON = 1, es decir, que toda el agua que excede el límite superior se pierde al instante. Tal simplificación puede ser válida en suelos muy permeables o situaciones de barbecho o estadios tempranos del cultivo. Sin embargo, si SWCON es menor que 1 y el cultivo extrae agua del suelo, las raíces de las plantas pueden extraer una parte del agua que excede el límite superior, que, por tanto, no se pierde por percolación. Cuando no existe un cultivo o acabamos de sembrar, las estimaciones de percolación profunda son poco sensibles al valor de SWCON. Ritchie ha sugerido valores SWCON para diferentes tipos de suelo:

- Suelo arcillosos (drenaje lento a moderadamente lento): 0.01 a 0.25
- Suelos de textura media (drenaje rápido a moderadamente rápido): 0.40 a 0.65
- Suelos arenosos (drenaje rápido a muy rápido): 0.75 a 0.85

Ejemplo 8.4.

Se trata de calcular la percolación profunda para un cultivo de maíz que crece en un suelo franco de 1000 mm de profundidad con los siguientes parámetros:

$$\theta_{PWP} = 0.10\ m^3\ m^{-3},\ \theta_{FC} = 0.25\ m^3\ m^{-3},\ \theta_{SAT} = 0.35\ m^3\ m^{-3},\ SWCON = 0.4.$$

El suelo comienza con un contenido de agua del suelo θ = 0.30 $m^3\ m^{-3}$. Ha caído una precipitación de 45 mm y 5 mm no se han infiltrado.

El total de agua infiltrada será:

$$P_I = 45 - 5 = 40\ mm$$

El almacenamiento a corto plazo viene dado por:

$$SWCC = Z\ (\theta_s - \theta) = 1000\ (0.35 - 0.30) = 50\ mm$$

que es mayor que la infiltración total. Por lo tanto 40 mm se almacenarán a corto plazo. El contenido de agua del suelo aumenta a:

$$\theta = \theta + 40/1000 = 0.30 + 0.04 = 0.34\ m^3\ m^{-3}$$

que es superior a θ_{FC}. Por lo tanto se producirá percolación profunda:

$$DP = SWCON\ Z\ (\theta - \theta_{FC}) = 0.4\ 1000\ (0.34\text{-}0.25) = 36\ mm$$

En el ejemplo anterior se aplicó la ecuación 8.11 para un solo día. Sin embargo, podemos extender este análisis a los días después del evento de lluvia para calcular el total de DP. Consideramos un suelo de profundidad Z (mm) con un contenido de agua inicial θ_i, que pierde agua por evaporación desde el suelo y transpiración del cultivo a una tasa igual a la ET (mm/día) (véase el Capítulo 9 para más detalles).

Después de la precipitación, una cantidad P_I (mm) se ha infiltrado, de manera que el contenido de agua es ahora: $\theta_i + P_I/Z$, que es mayor que θ_{FC} (de lo contrario no habría percolación). Partimos de la ecuación diferencial que describe la variación del contenido de agua:

$$\frac{d\theta}{dt} = SWCON\ (\theta - \theta_{FC}) - \frac{ET}{Z} \tag{8.12}$$

Y, después de la integración:

$$\theta = \theta_{FC} + \frac{\left[SWCON\left(\theta_i + \frac{P_I}{Z} - \theta_{FC}\right) + \frac{ET}{Z}\right] e^{-SWCON\,t} - ET/Z}{SWCON} \tag{8.13}$$

La ecuación 8.13 se puede utilizar para calcular el contenido de agua en el suelo en el momento t (días después de la precipitación) como una función de SWCON y ET. Esta ecuación también se puede utilizar para calcular el tiempo que tarda en alcanzarse la capacidad de campo:

$$t_{FC} = \frac{ln\left(1 + \frac{SWCON\left(\theta_i + \frac{P_I}{Z} - \theta_{FC}\right)}{ET/Z}\right)}{SWCON} \tag{8.14}$$

Durante ese tiempo, un total de t_{FC}·ET se pierde por evaporación desde el suelo y las plantas, por lo que se puede deducir la percolación de las precipitaciones totales hasta el momento t_{FC}, cuando el contenido de agua del suelo vuelve a la capacidad de campo:

$$\sum_{1}^{t_{FC}} DP = Z\left(\theta_i + \frac{P_I}{Z} - \theta_{FC}\right) - t_{FC}\ ET \tag{8.15}$$

Esta ecuación muestra que las pérdidas por evaporación compensan en parte las pérdidas por percolación, como se muestra en el ejemplo siguiente.

Ejemplo 8.4.

Consideremos un suelo franco de 1 m (1000 mm) de profundidad con un contenido de agua de 0.23 mm/mm. Un total de 50 mm se infiltra en el suelo. Vamos a calcular la percolación si: a) ET=1 mm/día, b) ET = 8 mm/día. Estos valores son típicos de suelo cubierto por vegetación en invierno y verano, respectivamente, en el sur de España.

Datos sobre el suelo: θ_{FC}=0.25, SWCON=0.6

a) ET = 1 mm/d

$$t_{FC} = \frac{ln\left(1 + \frac{0.6\left(0.23 + \frac{50}{1000} - 0.25\right)}{1/1000}\right)}{0.6} = 4.91 \text{ días}$$

$$\sum_{1}^{t_{FC}} DP = Z\left(\theta_i + \frac{P_I}{Z} - \theta_{FC}\right) - t_{FC}\,ET = 1000\left(0.23 + \frac{50}{1000} - 0.25\right) - 4.91 \cdot 1$$
$$= 25.1\ mm$$

b) ET = 8 mm/d

$$t_{FC} = \frac{ln\left(1 + \frac{0.6\left(0.23 + \frac{50}{1000} - 0.25\right)}{8/1000}\right)}{0.6} = 1.96 \text{ days}$$

$$\sum_{1}^{t_{FC}} DP = 1000\left(0.23 + \frac{50}{1000} - 0.25\right) - 1.96 \cdot 8 = 14.3\ mm$$

8.7. ESCORRENTÍA SUPERFICIAL

Los principales factores que determinan la escorrentía superficial son la intensidad de la lluvia, el tipo de suelo, el tipo de vegetación, la topografía y la rugosidad de la superficie. En el método del Servicio de Conservación de Suelos (US-SCS) todos estos factores se combinan en un solo factor, denominado "número de curva" (CN) que es proporcional al potencial de escorrentía.

Para el cálculo del CN, los suelos se clasifican en cuatro grupos hidrológicos de bajo a alto potencial de escorrentía:

A: Bajo potencial de escorrentía. Estos son suelos con alta tasa de infiltración cuando están húmedos. Por lo general, es el caso de suelos arenosos o con grava, profundos y bien drenados.

B: Suelos con tasa de infiltración moderada cuando están húmedos, profundidad media y textura media.

C: Suelos con bajas tasas de infiltración cuando se humedecen. Estos suelos son de textura fina o tienen un horizonte que dificulta el drenaje.

D: Alto potencial de escorrentía. Incluye suelos con muy bajas tasas de infiltración cuando está húmedos, tales como suelos arcillosos expansivos, suelos con alto nivel freático, suelos con una capa de arcilla cerca de la superficie y suelos poco profundos sobre materiales impermeables.

Además de las características del suelo, en el cálculo del CN, se considera la condición hidrológica del campo, que puede ser buena o mala dependiendo de la pendiente y las prácticas culturales. La Tabla 8.2 muestra los valores de CN, según el grupo hidrológico y la condición hidrológica, para diferentes tipos de cultivos y prácticas de conservación. El valor de CN que se muestra en la Tabla 8.2 implica condiciones medias de humedad del suelo cuando se produce la precipitación (Condición antecedente de humedad 2, AMC 2) y se llama CN2. Los valores de CN que

corresponden a baja AMC (CN1) o alta (CN3) se calculan mediante las siguientes ecuaciones:

$$CN_1 = CN_2 - 20\,\frac{100 - CN_2}{100 - CN_2 + CN_2 e^{2.533 - 0.0636\,(100 - CN_2)}} \tag{8.16}$$

$$CN_3 = CN_2 e^{0.00673\,(100 - CN_2)} \tag{8.17}$$

Tabla 8.2. Número de curva (CN) para diferentes suelos y tipos de cobertura.

Tipo de cobertura	Tratamiento	Condición hidrológica	GRUPO HIDROLOGICO			
			A	B	C	D
Barbecho	Suelo desnudo Residuos de cultivos (CR)	-	77	86	91	94
		Pobre	76	85	90	93
		Buena	74	83	88	90
Cultivos en línea	Hileras rectas (SR)	Pobre	72	81	88	91
		Buena	67	78	85	89
	SR y CR	Pobre	71	80	87	90
		Buena	64	75	82	85
	Curvas de nivel (C)	Pobre	70	79	84	88
		Buena	65	75	82	86
	C & CR	Pobre	69	78	83	87
		Buena	64	74	81	85
	Curvas de nivel y terrazas(C&T)	Pobre	66	74	80	82
		Buena	62	71	78	81
	C&T + CR	Pobre	65	73	79	81
		Buena	61	70	77	80
Cereales	SR	Pobre	65	76	84	88
		Buena	63	75	83	87
	SR + CR	Pobre	64	75	83	86
		Buena	60	72	80	84
	C	Pobre	63	74	82	85
		Buena	61	73	81	84
	C & CR	Pobre	62	73	81	84
		Bueno	60	72	80	83
	C&T	Pobre	61	72	79	82
		Buena	59	70	78	81
	C & T + CR	Pobre	60	71	78	81
		Buena	58	69	77	80

Leguminosas en alta densidad o pastos en rotación	SR	Pobre	66	77	85	89
		Buena	58	72	81	85
	C	Pobre	64	75	83	85
		Buena	55	69	78	83
	C&T	Pobre	63	73	80	83
		Buena	51	67	76	80
Pastos o praderas, con pastoreo continuo		Pobre	68	79	86	89
		Intermedia	49	69	79	84
		Buena	39	61	74	80
Prado – segado para heno			30	58	71	78
Mezcla de malas hierbas, gramíneas y arbustos		Pobre	48	67	77	83
		Intermedia	35	56	70	77
		Buena	30	48	65	73
Combinación árboles-hierba (plantaciones)		Pobre	57	73	82	86
		Intermedia	43	65	76	82
		Buena	32	58	72	79
Bosque		Pobre	45	66	77	83
		Intermedia	36	60	73	79
		Buena	30	55	70	77

Los valores de CN1 o CN3 no pueden exceder 100. Para valores de contenido de agua del suelo distintos de suelo seco (CN1) o saturado (CN3), el número de curva se puede calcular como una función del contenido de agua en la capa superior del suelo:

a) si el contenido de agua del suelo es superior a la capacidad de campo:

$$CN = CN2 + (CN3 - CN2)\ (\theta - \theta_{FC})/(\theta_{SAT} - \theta_{PWP}) \tag{8.18}$$

b) si el contenido de agua del suelo es inferior a la capacidad de campo:

$$CN = CN1 + (CN2 - CN1)\ (\theta - \theta_{PWP})/(\theta_{FC} - \theta_{PWP}) \tag{8.19}$$

Una vez se conoce CN, se calcula la cantidad máxima de agua (SMX, mm) que puede ser infiltrada o se almacena por encima de la superficie del suelo:

$$SMX = 254\left(\frac{100}{CN} - 1\right) \tag{8.20}$$

Si la precipitación diaria (P) es inferior a 0.2 SMX, la escorrentía es cero. De lo contrario, la escorrentía (SR, mm) se calcula como:

$$SR = \frac{(P - 0.2\,SMX)^2}{P + 0.8\,SMX} \tag{8.21}$$

Ejemplo 8.4.

Tenemos un cultivo de girasol que crece en un suelo profundo y llano de textura media. Se produce un evento de lluvia de 40 mm cuando el suelo está casi saturado

a) El suelo se puede incluir en el tipo B, y la condición hidrológica es buena debido a la ausencia de la pendiente. En la Tabla 8.2 se elige un valor de CN2 = 78.

b) Como el suelo está muy húmedo calculamos CN3 = 90 utilizando la Ec. 8.15 y asignamos por tanto CN = 90.

c) Calculamos SMX:

$$SMX = 254\left(\frac{100}{90} - 1\right) = 28\,mm$$

f) Comparamos 20% de SMX (5.6 mm) con la precipitación (40 mm). Como P> 0.2 SMX se producirá escorrentía:

$$SR = \frac{(40 - 0.2\,x\,28)^2}{40 + 0.8\,x\,28} = 19\,mm$$

En este caso casi el 50% de la precipitación se habría infiltrado.

8.8. PRECIPITACIÓN EFECTIVA

La precipitación efectiva (P_e) es aquella parte de la precipitación total durante un período de tiempo específico que no se pierde por escorrentía o percolación y por lo tanto se almacena en la zona radicular del cultivo. Es un concepto amplio que a veces se usa para caracterizar el balance hídrico estacional o mensual o para evaluar la distribución de eventos de lluvia. Se han propuesto una serie de métodos para el cálculo de precipitación efectiva mensual. Estos métodos han sido desarrollados para períodos mensuales y no deben ser utilizados para intervalos de tiempo más cortos. En cualquier caso, sólo pueden proporcionar estimaciones aproximadas, ya que ignoran factores clave como las propiedades del suelo o la distribución de la lluvia real dentro del mes.

8.8.1. Método de la FAO

Este método ha sido el resultado de un estudio realizado por la FAO en zonas áridas y sub-húmedas. La ecuación fue desarrollada para estimar la precipitación efectiva

mensual (P_e) que se excede en un 80% de los años, y se utiliza para el diseño de sistemas de riego. La lluvia efectiva se calcula mediante las siguientes ecuaciones:

$$P_e = 0.6\,P - 10 \qquad \text{si } P < 70 \text{ mm} \tag{8.22a}$$

$$P_e = 0.8\,P - 24 \qquad \text{si } P > 70 \text{ mm} \tag{8.22b}$$

8.8.2. Método del USDA-Soil Conservation Service

En este método, además de la precipitación, se tienen en cuenta la evapotranspiración del cultivo (ET) y el déficit de agua del suelo antes del riego:

$$P_e = f(SWD)\,[1.25\,P^{0.824} - 2.93]\,10^{0.001\,ET} \tag{8.23}$$

$$f(SWD) = 0.53 + 0.0116\,SWD - 8.94\,10^{-5}\,SWD^2 + 2.32\,10^{-7}\,SWD^3 \tag{8.24}$$

donde SWD (mm) es el déficit de agua del suelo justo antes del riego y ET se expresa en mm/mes.

BIBLIOGRAFÍA

Campbell GS, Norman JM (1998) An introduction to environmental biophysics. Springer.

Marshall TJ, Holmes JW, Rose CW (1996) Soil physics. Cambridge University Press.

Williams JR (1991) Runoff and water erosion. In: Hanks J and Ritchie JT (eds) Modeling plant and soil systems. ASA-CSSA-SSSA Madison WI USA pp 439-456.

Capítulo 9

Los componentes de la evapotranspiración

F.J. VILLALOBOS
L. TESTI
E. FERERES

RESUMEN:

La evapotranspiración es la suma de la evaporación desde la superficie del suelo, las superficies de las plantas y la transpiración. La evaporación desde el suelo en agronomía sigue un proceso de dos etapas, dependiendo de si la superficie del suelo está húmeda después de una lluvia o el riego o que ya se haya secado. Cuando la superficie del suelo está mojada la evaporación es potencialmente muy alta; es por eso que la frecuencia de las precipitaciones es el principal determinante de la evaporación del suelo, especialmente cuando la cobertura del suelo es baja. El modelo básico para cuantificar la evaporación es la ecuación de combinación, que más tarde se aplicó a cultivos y para el cálculo de la transpiración en una versión conocida como ecuación de Penman-Monteith. Esta ecuación tiene dos variables de resistencia (la resistencia aerodinámica y la de la cubierta), que son difíciles de cuantificar, ya que están cambiando constantemente con las condiciones ambientales y con el estado fisiológico de la planta. La ecuación de Penman-Monteith es el método establecido para analizar los procesos de evaporación en plantas y cubiertas y ha sido verificado ampliamente. La transpiración de los árboles depende en gran medida de la conductancia de la cubierta y es proporcional a la fracción de suelo cubierto o a la fracción de radiación interceptada.

9.1. INTRODUCCIÓN

La evaporación de las superficies con vegetación (o evapotranspiración, ya que combina la evaporación desde el suelo y la transpiración de las plantas) es el principal componente de la pérdida de agua de los ecosistemas terrestres por lo que su cuantificación es de gran importancia en hidrología, agronomía y otras ciencias relacionadas. Por otra parte, en agronomía, la evaporación, en general, es directamente proporcional a la productividad del cultivo, como se discutirá en el Capítulo 14.

La evapotranspiración (ET) es la suma de la evaporación directa desde la superficie del suelo (E_s), transpiración de la plantas (E_p) y la evaporación directa desde las superficies de las plantas (E_{ps}):

$$ET = E_s + E_p + E_{ps} \tag{9.1}$$

Estrictamente la transpiración es el flujo de vapor de agua a través de los estomas de las plantas. Para que este flujo se produzca, la evaporación debe tener lugar en las cavidades subestomáticas. Si la superficie de la cubierta está seca, E_{ps} = 0, de modo que:

$$ET = E_s + E_p \tag{9.2}$$

La transpiración (y la ET) máxima se produce cuando el agua del suelo no es limitante para la absorción de agua por la raíz, lo que suele ocurrir con contenido de agua del suelo por encima de un tercio del agua disponible (Fig. 9.1).

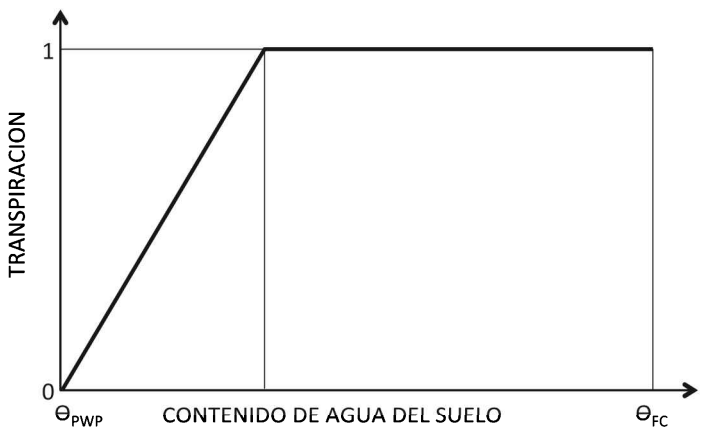


Figura 9.1. Efecto del contenido de agua del suelo sobre la transpiración o la evapotranspiración.

9.2. MEDIDA DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

La ET del cultivo se puede medir directamente mediante la determinación de la masa de agua que se pierde desde una superficie vegetal o estimar indirectamente.

La medida directa de la ET se realiza con lisímetros de pesada que son grandes recipientes abiertos en la parte superior para encerrar un volumen de suelo cuya masa puede medirse con precisión y donde se cultivan las plantas. Los lisímetros se colocan en el medio de campos grandes para asegurar que el microclima experimentado por las plantas dentro de ellos es el mismo que el de las plantas circundantes. En general son de gran tamaño y lo suficientemente profundos para que los sistemas radicales no se vean limitados por las paredes del lisímetro.

Por ejemplo, los dos primeros lisímetros de pesada instalados en España, se ubicaron en el Centro de Investigación Agrícola de Córdoba, en el año 1987 con una superficie de 6 m^2 cada uno y una profundidad de 1.5 m. Los sistemas de medida son lo suficientemente precisos para registrar pérdidas de agua en periodos cortos (5-10 minutos).

Las estimaciones de ET y los flujos de otros escalares (por ejemplo, la fotosíntesis del cultivo) pueden obtenerse usando métodos micrometeorológicos (Recuadro 9.1).

El método más simple para la estimación de la ET es el balance de agua, lo que requiere la estimación de los componentes del balance de agua, de modo que la ET se obtiene por diferencia. De la ecuación 8.3 en el Capítulo 8:

$$ET = P + I - SR - DP + WTC - \Delta TSWC \qquad (9.3)$$

Ejemplo 8.4.

Se midió el contenido de agua de un suelo de 1 metro bajo un cultivo de soja en dos fechas (11 de agosto y 19 de agosto). El contenido medio de agua en el suelo fue de 0.22 (11 de agosto) y 0.175 m^3m^{-3} (19 de agosto). En ese período se ha producido un episodio de lluvia de 20 mm. Suponiendo que no hay escorrentía ni percolación profunda y que el nivel freático es demasiado profundo para aportar agua a la zona radical mediante ascenso capilar, podemos calcular la ET para el período como la diferencia entre la precipitación y el aumento en el contenido total de agua en el suelo:

El contenido de agua del suelo en la primera fecha será:

TSWC (11 de agosto) = 0.22 x 1000 = 220 mm

Análogamente se calcula el contenido de agua en la segunda fecha, resultando en TSWC (19 de agosto) = 175 mm

El aumento será: ΔTSWC=TSWC(19 de agosto)-TSWC(11 de agosto)= 175-220 = -45 mm

Y así, la ET será:

ET = 20 + 45 = 65 mm

Recuadro 9.1. Métodos micrometeorológicos

Las mediciones de variables meteorológicas cerca de la cubierta permiten la estimación de los componentes del balance de energía. Por ejemplo mediante la medición de la radiación neta, el flujo de calor al suelo y los gradientes de temperatura y de presión de vapor por encima del dosel es posible estimar el flujo de calor latente, usando el llamado método de la relación de Bowen.

Si en lugar de la medición de los gradientes se utiliza un termómetro de infrarrojos para obtener temperatura de la cubierta se puede calcular el flujo de calor sensible y por lo tanto deducir flujo de calor latente.

Un enfoque más sofisticado es el método de covarianza de torbellinos. Se basa en mediciones de alta frecuencia de escalares (temperatura, humedad absoluta, concentración de CO_2) y la velocidad del viento vertical. La covarianza de cualquier escalar y la velocidad vertical del viento (w) proporciona una medida del flujo del escalar. Por ejemplo, la covarianza de la temperatura y w es directamente proporcional al flujo de calor sensible, mientras que la concentración de vapor de agua y w se relacionan con el flujo de calor latente. Téngase en cuenta que esta técnica se puede aplicar para medir el flujo de cualquier producto químico (por ejemplo, amoníaco), siempre que tengamos el sensor adecuado para medir su concentración.

9.3. LA EVAPORACIÓN DESDE LA SUPERFICIE DEL SUELO

Philip describió la evaporación desde la superficie de un suelo desnudo (E_s) después de ser mojado, como un proceso en tres etapas. En la primera etapa (limitada por energía) la superficie del suelo está mojada y la conductividad hidráulica es alta, de modo que la tasa de evaporación sólo está limitada por la cantidad de energía disponible para la evaporación en la superficie. En este caso, la evaporación es aproximadamente igual a la evaporación de una pradera que se define en el Capítulo 10 como evapotranspiración de referencia (ET_0). Esta etapa continúa hasta que una cierta cantidad de agua se ha evaporado (U_e) que depende del tipo de suelo, y va desde 5-6 mm (suelos bien drenados) hasta 12-14 mm (suelos arcillosos).

Cuando comienza la segunda etapa (limitada por el suelo), la conductividad hidráulica del suelo se ha reducido a valores que limitan el flujo de agua desde las capas más profundas hasta la superficie del suelo. Durante esta fase E_s decrece en función de la raíz cuadrada del tiempo desde el inicio de la segunda fase (t):

$$E_s = c_e\left(\sqrt{t} - \sqrt{t-1}\right) \tag{9.4}$$

donde c_e es una constante que depende del tipo de suelo, aunque su valor se acerca generalmente a 3.5 mm día$^{-0.5}$.

La tercera etapa descrita por Philip corresponde a suelo extremadamente seco en el que el agua se transporta a la superficie del suelo como vapor de agua y la evapo-

ración es extremadamente baja. Para propósitos prácticos en agronomía podemos calcular E_s considerando sólo las dos primeras fases.

Por lo tanto, la evaporación de un suelo depende principalmente de la disponibilidad de energía en su superficie y del contenido de agua de las capas superiores del suelo (alrededor de 30 cm). Por lo tanto, cuando el suelo está mojado, E_s es similar a la evaporación de un cultivo de cobertura completa, y se puede suponer igual a ET_0. Por el contrario, cuando la superficie del suelo se seca, E_s se reduce a valores muy bajos (Figura 9.2).

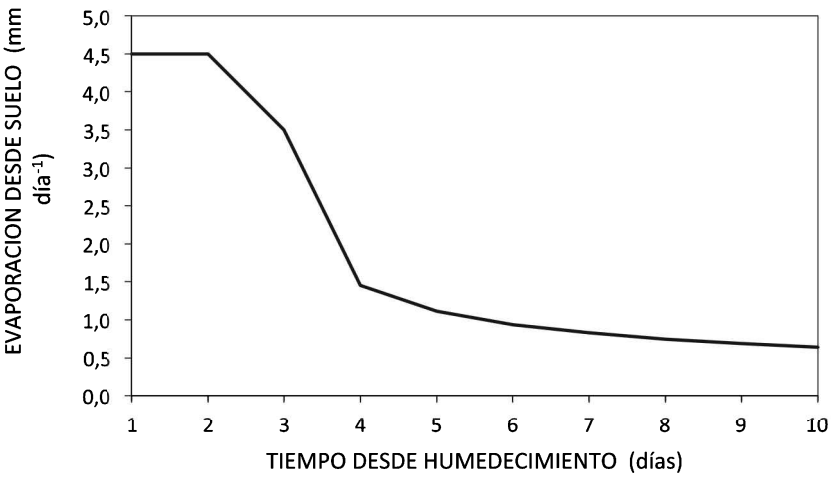


Figura 9.2. Tasa de evaporación del suelo después de ser humedecido. La ET de referencia es de 4.5 mm/día. El parámetro U_e es 9 mm.

Si el suelo está cubierto en parte por un cultivo o por residuos de cultivo, la cantidad de energía que llega a la superficie del suelo se reduce, y también lo hará E_s para la primera fase (E_{s1}):

$$E_{s1} = ET_0(1 - f_{PI}) \tag{9.5}$$

donde f_{PI} es la fracción de radiación interceptada (que no llega a la superficie del suelo).

Ejemplo 8.4.

Ha llovido y un suelo se ha humedecido. El parámetro del suelo para la evaporación durante la primera fase (limitada por energía) es U_e = 9 mm y ET_0 es 4.5 mm/día.

En este caso, la primera fase (E_s igual a ET_0) tendrá una duración de 2 días, ya que es el tiempo necesario para evaporar 9 mm:

$$U_e/ET_0 = (9\text{ mm}) / (4.5\text{ mm/día}) = 2\text{ días}$$

Por lo tanto $E_s(1) = E_s(2) = 4.5$ mm/día

La segunda fase comienza en el tercer día. Tomando c_e = 3.5 mm/día$^{0.5}$:

$$E_s(3) = 3.5\ (1^{0.5} - (1\text{-}0)^{0.5}) = 3.50 \text{ mm/día}$$

$$E_s(4) = 3.5\ (2^{0.5} - (2\text{-}1)^{0.5}) = 1.45 \text{ mm/día, y así sucesivamente.}$$

Si la misma situación se produjera en un olivar que intercepta el 40% de la radiación (f_{PI}=0.4), entonces la evaporación en la fase 1 sería:

$$E_{s1} = ET_0\ (1 - f_{PI}) = 4.5 \cdot (1 - 0.4) = 2.7 \text{ mm/día}$$

En este caso, la primera fase tendrá una duración de 3.3 días (que puede ser redondeado a 3). En el cuarto día se iniciará la segunda fase:

$$E_s(4) = 3.5\ (1^{0.5} - (1\text{-}0)^{0.5}) = 3.50 \text{ mm/día}$$

$$E_s(5) = 3.5\ (2^{0.5} - (2\text{-}1)^{0.5}) = 1.45 \text{ mm/día, y así sucesivamente.}$$

De acuerdo con el modelo de dos fases de evaporación, la E_s promedio durante un período determinado (mes, año) será proporcional a la frecuencia de humedecimiento. Si los eventos de mojado tienen una duración media de WD y el intervalo medio entre dos eventos consecutivos es WI, podemos calcular la E_s promedio usando las ecuaciones para la evaporación en la fase 1 para WD-0.5 días y las dos ecuaciones (fases 1 y 2) para WI - WD + 0.5 días, suponiendo que en el día WD la precipitación se detiene en la mitad del día.

La evaporación media del suelo para el período será:

$$E_{sm} = \frac{(WD - 0.5)\ ET_0 + U_e + c_e\sqrt{WI - (WD - 0.5) - \frac{U_e}{ET_0} - t'}}{WI} \tag{9.6}$$

donde t'=$(c_e/ET_0)^2$ si $c_e > ET_0$. De lo contrario t '= 0. Téngase en cuenta que la función raíz cuadrada de la ecuación 9.6 es válida solamente para los valores positivos. Un valor negativo indicaría que el suelo se mantiene en primera fase de evaporación por lo que su evaporación media sería equivalente a ET_0.

Ejemplo 9.3.

Un agricultor ha sembrado un cultivo de verano durante el mes de junio en el sur de Italia (ET_0= 6 mm/d). Para asegurar la emergencia del cultivo, aplica riegos cada 5 días (WI = 5 d, WD = 1 d). El suelo tiene un parámetro de evaporación en primera fase U_e = 9 mm y en segunda fase, c_e = 3.5 mm/día$^{0.5}$. Se trata de calcular la evaporación promedio del período.

Aplicando la ecuación 9.6:

$$E_{sm} = \frac{0.5\,x\,5\ +\ 9 +\ 3.5\sqrt{5 - 0.5 -\ 9/6}}{5} = 3.5\ mm/d$$

Ejemplo 9.3.

El número medio de días de lluvia en Córdoba (España) durante marzo (ET_0= 3 mm/d) es de 9.3. En principio, esto implicaría que, en promedio, se produciría un evento de lluvia cada 3.3 días. Sin embargo, los días de lluvia tienden a agruparse, a ocurrir en días consecutivos. De acuerdo con Villalobos y Fereres el intervalo medio entre dos períodos consecutivos de lluvia puede estimarse como:

$$WI = \frac{1}{0.75\,f_w(1 - f_w)} \tag{9.7}$$

donde f_w es la frecuencia media de días de lluvia. En el caso de Córdoba f_w = 9.3/31 = 0.3, y por lo tanto, WI = 6.3 días.

Cada período de 6.3 días estaría compuesto de 1.9 días de lluvia (30% de los 6.3 días) y 4.4 días secos. Ahora podemos calcular la evaporación media desde el suelo para el mes de Marzo, aplicando la ec. 9.6 con WI = 6.3 días y WD=1.9 días (asumimos U_e=6 mm, c_e= 3.5 mm $^{-0.5}$):

$$E_{sm} = \frac{(1.9 - 0.5)\,x\,3\ +\ 6 +\ 3.5\sqrt{6.3 - (1.9 - 0.5) -\ 6/3}}{6.3} = 2.6\ mm/d$$

9.4. ANÁLISIS DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN CON LA ECUACIÓN DE PENMAN-MONTEITH

La primera formulación de una ecuación de combinación para calcular la evaporación se debe a Penman en 1948, que combina la ecuación del balance de energía con las de los flujos de calor latente y calor sensible. Soluciones similares fueron propuestas por Ferguson en Australia y Budyko en Rusia. La formulación más generalizada de la ecuación se debe a Monteith que comenzó a partir de las siguientes ecuaciones:

el balance de energía (Capítulo 7):

$$R_n - G = LE + H \tag{9.8}$$

Flujo de calor latente (Capítulo 5):

$$LE = \frac{\rho C_p}{\gamma}\frac{(e_{sc} - e_a)}{(r_c + r_a)} \tag{9.9}$$

Flujo de calor sensible (Capítulo 5):

$$H = \rho C_p \frac{(T_c - T_a)}{r_a} \tag{9.10}$$

En este método, la pendiente de la función de presión de vapor de saturación frente a la temperatura (Δ, kPa K^{-1}) se aproxima como:

$$\Delta = \frac{e_{sc} - e_s}{T_c - T_a} \tag{9.11}$$

donde e_{sc} es la presión de vapor de saturación a la temperatura del dosel (T_c) y e_s es la presión de vapor de saturación a la temperatura del aire (T_a). Por lo tanto:

$$e_{sc} = e_s + \Delta(T_c - T_a) \tag{9.12}$$

Ahora sumado y restando e_s en la ecuación 9.11 y usando la ecuación 9.14:

$$e_{sc} - e_a = e_{sc} - e_a + e_s - e_s = \Delta(T_c - T_a) + e_s - e_a = \Delta(T_c - T_a) + VPD \tag{9.13}$$

Así la ecuación 9.9 se puede escribir como:

$$LE = \frac{\rho C_p}{\gamma} \frac{\Delta(T_c - T_a) + VPD}{(r_c + r_a)} \tag{9.14}$$

A partir de las ecuaciones 9.10 y 9.8 podemos escribir el término $\Delta(T_c - T_a)$ como:

$$\Delta(T_c - T_a) = \frac{\Delta r_a H}{\rho C_p} = \frac{\Delta\, r_a (Rn - G - LE)}{\rho\, Cp} \tag{9.15}$$

que sustituido en la ecuación 9.14, permite resolver LE, lo que lleva a la ecuación de Penman-Monteith:

$$LE = \frac{\Delta\,(R_n - G) + \frac{\rho C_p}{r_a} VPD}{\Delta + \gamma\,(1 + \frac{r_c}{r_a})} \tag{9.16}$$

La ecuación de Penman-Monteith indica que la evaporación de los cultivos depende de factores meteorológicos (radiación, temperatura, humedad, velocidad del viento) y factores del cultivo (r_c). En el caso de r_a aparte de las características del cultivo (altura, área foliar) hay una dependencia de las condiciones meteorológicas (velocidad del viento).

Esta ecuación tiene el inconveniente de requerir información sobre la resistencia de la cubierta (Capítulo 5) que a su vez depende de diferentes factores ambientales como la temperatura, la radiación y el déficit de presión de vapor (VPD). Se ha encontrado que en un gran número de especies de plantas, r_c es proporcional a VPD. Así, por un lado, un alto VPD aumenta LE, pero si r_c aumenta también, esto contribuye a la reducción de la transpiración del cultivo cuando la demanda evaporativa es alta.

La ecuación de Penman-Monteith es muy útil desde un punto de vista conceptual. Por ejemplo, cuando el VPD tiende a cero (condiciones extremadamente húmedas) y la resistencia de la cubierta es pequeña en comparación con la resistencia aerodinámica (por ejemplo, cubierta poco rugosa como una pradera) la evaporación tiende a:

$$LE = \frac{\Delta\,(R_n - G)}{\Delta + \gamma} \tag{9.17}$$

Este valor se ha denominado "evaporación de equilibrio" y corresponde también a la evaporación de una cubierta que tiene una muy alta resistencia aerodinámica. En casos como éste la evaporación depende sólo de la radiación y la temperatura (ya que Δ depende de la temperatura). Estas condiciones se encuentran en cultivo bajos, con humedad alta y resistencia aerodinámica muy alta por la ausencia de viento o en cultivos que crecen en invernaderos en condiciones de calma.

El caso opuesto es el de cubiertas muy rugosas y condiciones ventosas (baja r_a) con alta resistencia de la cubierta (por ejemplo, bosques de árboles con alturas variables y árboles aislados con hojas pequeñas, tales como los olivares). En este caso es fácil demostrar que la evaporación (llamada "evaporación impuesta") depende sólo de VPD y resistencia de la cubierta:

$$LE = \frac{\rho C_p}{\gamma}\frac{1}{r_c}\,VPD \tag{9.18}$$

Estos dos extremos de evaporación de equilibrio y evaporación impuesta se dice que corresponden a cubiertas desacopladas y acopladas en relación con la atmósfera. En una cubierta perfectamente acoplada la ausencia de resistencia aerodinámica hace que la transpiración sea muy sensible a los cambios en VPD. Por el contrario, una cubierta desacoplada (por ejemplo, pradera en ausencia de viento) se encuentra de alguna manera aislada de los cambios en las condiciones atmosféricas por encima de ella. Si los estomas se cierran, la menor transpiración conduce a una mayor temperatura de la cubierta que conduce a su vez a un aumento de la transpiración (ver ec. 5.2 en el Capítulo 5). En el campo, las cubiertas vegetales no se encuentran perfectamente acopladas ni desacopladas sino en algún punto intermedio. Las mejor acopladas a la atmósfera (por ejemplo, plantaciones de árboles) pueden ejercer un mayor control de la transpiración a través del cierre de los estomas si se comparan con las desacopladas, como los cultivos anuales de baja estatura.

9.5. LA TRANSPIRACIÓN

El cálculo de la transpiración real es difícil ya que depende de factores meteorológicos (por ejemplo, radiación) y fisiológicos, sobre todo de la respuesta de los estomas al ambiente aéreo, pero incluyendo también las respuestas del sistema radicular a factores del suelo (temperatura, contenido de agua). Para condiciones de buen suministro de agua, se puede seguir un enfoque muy simple. Para una condición dada, el coeficiente de transpiración, es decir el cociente transpiración/ET_0, es proporcional a la fracción de la radiación interceptada, por lo que la transpiración (E_p, mm/día) se puede calcular como:

$$E_p = f_{PI} K_{tf} ET_0 \tag{9.19}$$

donde f_{PI} es la fracción de radiación interceptada, K_{tf} es el coeficiente de transpiración para interceptación 100%, que es cercano a 1 para la mayoría de los cultivos herbáceos y arbóreos de hoja perenne y entre 1.2 y 1.8 para árboles frutales de hoja caduca (Tabla 9.1).

Tabla 9.1. Coeficientes empíricos para calcular la conductancia de la cubierta de algunas especies de árboles frutales. Se indica también el coeficiente de transpiración para interceptación 100%. NI: no se dispone de información.

Especies	a	b	K_{tf}
	(μE mol^{-1})	(μE mol^{-1} kPa^{-1})	adimensional
Naranjo	1002	1666	0.8
Nogal	1287	673	1.4
Manzano	442	911	1.8
Olivo	1211	1447	1.1
Albaricoquero	452	2050	NI
Melocotón	333	633	1.8
Pistacho	359	624	1.9
Almendro	NI	NI	1.25

Para los árboles aislados, eq. 9.19 se convierte en:

$$E_{p\,tree} = RR_i K_{tf} ET_0 \tag{9.20}$$

donde $E_{p\,tree}$ es la transpiración del árbol (L/día/árbol) y RR_i es la interceptación de radiación relativa, es decir, la relación entre el total de radiación interceptada por el árbol y la radiación incidente sobre 1 m^2 de superficie horizontal (ver Capítulo 3).

Ejemplo 9.3.

En el Ejemplo 3.5, se calculó la interceptación de radiación relativa de un olivo con un radio de 0.5 m en Córdoba, España el 21 de marzo como RR_i=0.69 m^2.

Si la ET_0 es 3 mm $día^{-1}$, podemos calcular la transpiración del árbol como:

$$E_{p\,tree} = RR_i K_{tf} ET_0 = 0.69 \cdot 1 \cdot 3 = 2.07\ L\ día^{-1}$$

Villalobos et al. (2014) propusieron un modelo más detallado de cálculo de la transpiración de plantaciones de frutales. Este modelo considera una conductancia de la cubierta media diaria (G_c), es decir, la inversa de la resistencia de la cubierta para todo el árbol. El parámetro G_c se relaciona con el VPD y con la radiación interceptada por la cubierta como:

$$G_c = \alpha \frac{Q\ R_s}{a + b\ VPD} \tag{9.21}$$

donde Q es la fracción de radiación interceptada por la cubierta (véase el Capítulo 3), R_s es la radiación solar diaria (MJ m^{-2} $día^{-1}$), VPD es el déficit de presión de vapor (kPa), α es un coeficiente genérico y a y b son coeficientes empíricos que dependen de la especie (ver Tabla 9.1). Como $r_c = 1/G_c$, podemos utilizar la ecuación de Penman-Monteith (ecuación 9.16) para calcular la transpiración de la cubierta. Como las plantaciones de frutales están generalmente bien acoplados con la atmósfera, se pueden obtener resultados similares usando la ecuación de evaporación "impuesta" (ec. 9.18), que es mucho más fácil de aplicar, ya que no requiere el conocimiento de la resistencia aerodinámica, r_a. La transpiración (en mm/día) por lo tanto, se puede calcular como:

$$E_p = 37.08\ 10^3 \frac{Q\ R_s}{a + b\ VPD} \frac{VPD}{P_{at}} \tag{9.22}$$

donde P_{at} es la presión atmosférica (kPa). El coeficiente 37.08 10^3 se utiliza para convertir las unidades a mm/día. Este modelo ha sido desarrollado y probado en climas semiáridos, es decir, cuando la transpiración es regulada principalmente por la demanda evaporativa de la atmósfera en lugar de sólo por la radiación solar.

Ejemplo 9.3.

Un olivar intensivo a una altitud de 100 m intercepta el 52% de la radiación incidente. Vamos a calcular su transpiración en un día soleado si la radiación solar diaria es 27.6 MJ m^2 day^{-1} y VPD promedio de 2.8 kPa. Supongamos una presión atmosférica de 101 kPa.

Utilizando la ecuación 9.24 con los coeficientes de la Tabla 9.1 para olivo (a= 1211 μE mol^{-1} y b= 1447 μE $mol^{-1}kPa^{-1}$),

$$E_p = 37.08\ 10^3 \frac{0.52 \cdot 27.6 \cdot 2.8}{(1211 + 1447 \cdot 2.8) \cdot 100.104} = 2.83\ mm\ día^{-1}$$

9.6. LA EVAPORACIÓN DESDE CULTIVOS MOJADOS

Cuando la planta está mojada (por ejemplo, inmediatamente tras un evento de lluvia) la película de agua y las gotas que cubren el follaje se evaporarán directamente hacia la atmósfera. Téngase en cuenta que este flujo de evaporación no es ni transpiración ni evaporación desde el suelo, aunque el agua implicada también procede de la lluvia o el riego: debe ser por tanto evaluada y considerada como parte del flujo de evapotranspiración (véase la Ecuación 9.1) para evaluar correctamente la evaporación como componente del balance hídrico.

Aunque el flujo de evaporación directa de cultivos mojados se suele pasar por alto, puede ser apreciable en el caso de lluvias muy frecuentes sobre todo para cultivos con alto LAI que pueden interceptar una cantidad significativa de la lluvia. La capacidad máxima de interceptación de lluvia por las especies agrícolas con plena cobertura del suelo es de alrededor de 0.25 mm por unidad de LAI, es decir, un cultivo de trigo con LAI = 4 puede interceptar 1 mm de lluvia. Otro caso es el de sistemas de riego por aspersión movidos mecánicamente (pivotes) con riego de alta frecuencia ya que una parte significativa de la aplicación es interceptada por el cultivo antes de que se infiltre en el suelo. En todos los casos, la evaporación directa desde la

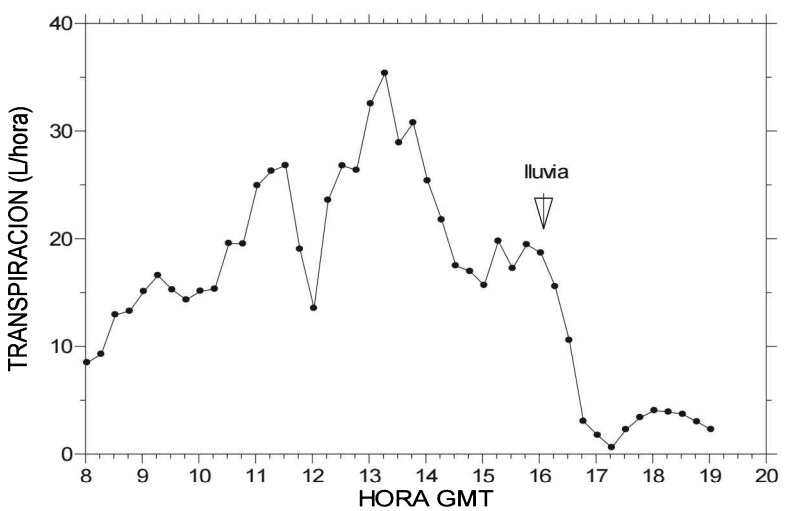


Figura 9.3. Evolución temporal de la transpiración de un nogal en Córdoba (España) el 5 de junio de 2009. La lluvia empezó a las 14:20 (flecha vertical) y duró una hora.

superficie de plantas es el proceso principal a evaluar para poder predecir la duración del agua libre sobre el cultivo después de una precipitación. Este conocimiento es importante porque el intervalo de tiempo que un cultivo permanece mojado está estrechamente relacionado con el riesgo de infección por muchas enfermedades causadas por hongos. Además, durante ese intervalo, la tasa de transpiración es nula (ver Fig. 9.3), por lo que no hay extracción de agua por las raíces con la reducción asociada de absorción de nutrientes. Para calcular la evaporación de cultivos mojados podemos usar la ecuación de Penman-Monteith asumiendo que la resistencia de la cubierta es cero.

BIBLIOGRAFÍA

Cuenca RH (1989) Irrigation system design - an engineering approach. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA.

Doorenbos J, Pruitt WO (1977) Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper nº 24. FAO, Rome.

Monteith JL (1964) Evaporation and environment. Symp Soc Exp Biol 19:205–34.

Ritchie JT (1972) Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. Water Resour Res, 8:1204-1213.

Villalobos FJ, Testi L, Orgaz F, García-Tejera O, López-Bernal A, González-Dugo MV, Ballester-Lurbe C, Castel JR, Alarcón-Caballero JJ, Nicolas-Nicolas E, Girona J, Marsal J, Fereres E (2013) Modelling canopy conductance and transpiration of fruit trees in Mediterranean areas: a simplified approach. Agric For Meteorol,171-172:93-103.

Capítulo 10

Cálculo de la evapotranspiración y de las necesidades de agua de los cultivos

F.J. VILLALOBOS
L. TESTI
E. FERERES

RESUMEN:

La ET de referencia ET (ET_0) se define como la ET de una pradera cortada con cobertura total del suelo, y un suministro ilimitado de agua y nutrientes. En ausencia de déficit de agua, la ET de cualquier cultivo se puede calcular como el producto K_c x ET_0 donde K_c es el coeficiente de cultivo, que depende de factores relacionados con los cultivos (área foliar, rugosidad) y la ET_0 es una función de variables climáticas (radiación, temperatura, humedad y velocidad del viento). La ecuación principal para el cálculo de ET_0 es la de Penman-Monteith adaptada por la FAO, aunque la ecuación de Hargreaves se puede utilizar cuando sólo se dispone de datos de temperatura del aire. El K_c se calcula por el método propuesto por la FAO, que utiliza funciones lineales entre las fechas del ciclo del cultivo, inicio, máximo y cosecha. El K_c inicial depende de la frecuencia de humedecimiento del suelo y de la ET_0. Los valores máximos de K_c de cultivos anuales y frutales de hoja caduca se encuentran típicamente entre 1.0 y 1.3 (mediana 1.2). La necesidad de agua de riego de un cultivo es la diferencia entre la ET y la precipitación efectiva, aunque el papel del agua almacenada en el suelo como factor que contribuye a satisfacer la demanda de ET puede ser importante en algunas situaciones para reducir el dimensionamiento (e inversión) de la red de riego.

10.1. INTRODUCCIÓN

La ET en ausencia de estrés hídrico se calcula como el producto:

$$ET = K_c ET_0 \tag{10.1}$$

donde K_c es el coeficiente de cultivo, que depende de factores relacionados con el cultivo (área foliar, rugosidad, manejo del cultivo) y ET_0 es la ET de referencia, por definición, la ET de una superficie de hierba cortada bien regada, que en teoría es sólo una función de las variables climáticas (radiación, temperatura, humedad y velocidad del viento). Esta expresión es siempre válida a menos que el estrés hídrico reduzca la ET, lo que generalmente ocurre cuando se agota el 65-80% del agua extraíble del suelo. Por debajo de este valor el K_c disminuye linealmente hasta 0 cuando se alcanza el punto de marchitez (Fig. 9.1).

El método usual de cálculo de la ET de un cultivo es calcular la ET_0 en función de datos meteorológicos y aplicar un K_c variable que cambia con la etapa de desarrollo del cultivo. Se han propuesto numerosos métodos para estimar ET_0 (por ejemplo Penman-FAO) o el K_c (por ejemplo, método FAO) que serán descritos a continuación.

10.2. ET DE REFERENCIA

La ET de referencia (ET_0) se define como la ET de una pradera de gramíneas de corta estatura (8-15 cm) que cubre por completo el suelo, y con un buen suministro de agua y nutrientes. El concepto de ET_0 vino a sustituir el término "ET potencial" que se utilizó ampliamente en el pasado pero que carece de una definición precisa.

En algunas zonas, existen redes de estaciones meteorológicas automáticas que proporcionan información diaria a través de Internet que permitiría la aplicación de fórmulas de combinación basadas en la ecuación de Penman-Monteith. Sin embargo, en muchas áreas del mundo hay una escasez de información agrometeorológica que limita el uso de los métodos más precisos.

Si sólo se dispone de datos de temperatura máxima y mínima se puede usar la ecuación de Hargreaves (ver 10.2.1) que proporciona una buena aproximación en muchas áreas. En algunos casos se dispone de un tanque de evaporación en la explotación con el que se puede estimar la ET_0 como se muestra en el Apéndice 10.1.

La ET_0 sigue un patrón a lo largo del año similar al de la radiación solar. A modo de ejemplo, la Figura 10.1 muestra la ET_0 diaria calculada por la ecuación de Penman-Monteith en Santaella (sur de España, clima mediterráneo semiárido), típica de latitudes medias. Los valores medios van desde 1 mm/día durante el invierno hasta 7 mm/día durante el verano. La ET_0 anual media es 1278 mm.

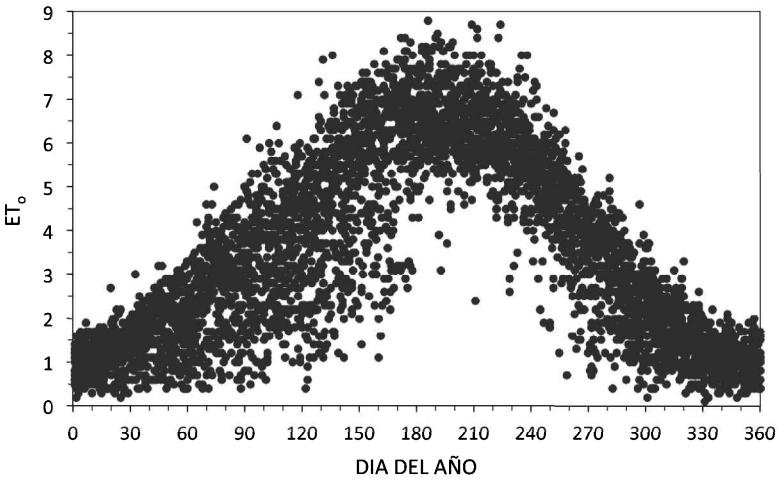


Figura 10.1. Variación a lo largo del año de la ET de referencia calculada utilizando el método de Penman-Monteith-FAO para Santaella (España) 2000-2013.

10.2.1. Método de Hargreaves

En 1985 Hargreaves y Samani propusieron una ecuación simple para estimar ET_0 (en mm/día):

$$ET_0 = 5.52\ 10^{-3} K_{RS} R_A \left(t_{avg} + 17.8\right)\sqrt{t_{max} - t_{min}} \tag{10.2}$$

en la que R_A es la radiación extraterrestre (MJ m^{-2} $día^{-1}$) y t_{avg}, t_{max} y t_{min} son la temperatura media, máxima y mínima del aire (ºC), respectivamente, mientras que K_{RS} es otro coeficiente ya definido en el Cap. 3. (Ec. 3.7). Por lo general, los valores de K_{RS} varían entre 0.16 y 0.19 para zonas interiores y costeras, respectivamente. Esta ecuación ha demostrado un buena capacidad predictiva para diferentes áreas a pesar de estar basado únicamente en la temperatura del aire. Esto se debe a que incluye un término asociado con la radiación potencial de la ubicación, la radiación extraterrestre y una variable relacionada con el grado de nubosidad (la amplitud de la temperatura del aire). Así, en días muy nublados hay poco calentamiento durante el día (baja radiación solar) y poco enfriamiento durante la noche (las nubes reducen la pérdida de radiación de onda larga). Por lo tanto las temperaturas máximas y mínimas no diferirán mucho. Por el contrario, en los días despejados el mayor calentamiento durante el día y el mayor enfriamiento durante la noche conduce a una mayor diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas. El método de Hargreaves puede ser menos fiable cuando se aplica en zonas con poca oscilación térmica diaria o cuando la amplitud de la temperatura está influenciada por factores no relacionados con la radiación solar, como por ejemplo, la cercanía de grandes masas de agua (regiones costeras).

10.2.2. Método de Penman-Monteith-FAO

Esta ecuación, en la forma propuesta por la FAO, se ha convertido en el estándar para el cálculo de ET_0. Aplicando la ecuación de Penman-Monteith (ec. 9.16.) a una pradera hipotética de altura 0.12 m y resistencia de la cubierta 69 s/m, podemos deducir la ET_0 (mm/día) para períodos de 24 h como:

$$ET_0 = \frac{\Delta\, R_n + 0.5\, VPD\, U_2}{2.45\, [\Delta + 0.067\,(1 + 0.332\, U_2)]} \tag{10.3}$$

donde Δ (kPa K^{-1}) es la pendiente de la función de la presión de vapor en saturación frente a la temperatura, R_n es la radiación neta (MJ m^{-2} $día^{-1}$), VPD es el déficit de presión de vapor (kPa) y U_2 es la velocidad del viento a 2 m de altura (m/s).

El valor de Δ (kPa K^{-1}) se puede calcular como:

$$\Delta = \frac{4098\, e_s}{[237.3 + \mathrm{T}]^2} \tag{10.4}$$

donde T es la temperatura del aire (ºC) y e_s es la presión de vapor en saturación (kPa), que es una función de la temperatura (ec. 5.2).

10.3. COEFICIENTES DE CULTIVO

El coeficiente de cultivo es un parámetro que refleja las características de la cubierta que afectan a la ET, tales como el área foliar, la altura, la fracción de cobertura del suelo, etc. Su valor se determina experimentalmente como:

$$K_c = \frac{ET}{ET_0} \tag{10.5}$$

En los cultivos regados el K_c depende principalmente de la fracción de cobertura del suelo, y, si ésta es baja, también dependerá del contenido de agua en la superficie del suelo, ya que éste determina la velocidad de evaporación desde el suelo (véase 9.3). Por lo tanto, cuando el cultivo no ha emergido todavía, el K_c de un suelo desnudo seco puede ser tan bajo como 0.1, pero si se moja el suelo, el K_c aumenta hasta valores cercanos a 1. Cuando el cultivo cubre completamente el suelo, el K_c prácticamente no depende del contenido de agua de la superficie del suelo, y por lo general es superior a 1 (1.5 a 1.30), con un valor típico de 1.20.

En algunos casos, el flujo de calor latente es superior a la radiación neta, es decir, se utiliza una cantidad de calor sensible para evaporar agua. Este fenómeno se

produce normalmente debido al movimiento de las masas de aire caliente y seco de las zonas secas que rodean una zona húmeda donde hay agua disponible para la evaporación (efecto oasis). Podemos distinguir el efecto "tendedero", cuando la advección ocurre a nivel de parcela, y se caracteriza por la disminución de la contribución de calor sensible desde el borde hacia el interior de la parcela. En una escala más pequeña (micro-advección) hay un flujo de calor sensible desde el suelo seco y caliente hacia las plantas circundantes. En el caso de que un campo regado aislado esté rodeado de tierra seca (barbecho, rastrojos, cultivos secos) el efecto tendedero proporciona energía adicional para ET por lo que el coeficiente de cultivo puede ser mucho mayor que los valores indicados anteriormente. Este aumento será mayor para parcelas pequeñas con plantas altas, pero no existe un modelo fiable para cuantificar exactamente el valor de K_c en estas situaciones. Algunos autores sugieren que el valor extremo de K_c para las parcelas regadas aisladas puede ser tan alto como 2.5, pero este valor debe considerarse un límite hipotético que se alcanza sólo en condiciones extremas poco frecuentes y por un tiempo limitado.

El K_c no es constante durante el ciclo de cultivo, debido a cambios en la cobertura del suelo y en la altura de las plantas, al humedecimiento de la superficie del suelo y al envejecimiento de las plantas. El método más extendido para estimar el valor del coeficiente de cultivo en cualquier momento del ciclo de cultivo es el propuesto por la FAO (Doorenbos y Pruitt, 1977). Este método representa la curva de K_c como un conjunto de líneas rectas. Para definir la curva es necesario conocer de antemano la duración de las fases A, B, C y D, y el valor de K_c en tres puntos (K_{c1} , K_{c2} and K_{c3}). La fase inicial (A) termina cuando el cultivo alcanza el 20% de cobertura del suelo, mientras que la fase de crecimiento rápido (B) termina cuando la cobertura del suelo es del 70-80%, lo que por lo general corresponde a valores de índice de área foliar alrededor de 2.5-3.0. La Figura 10.2 muestra un ejemplo de una curva

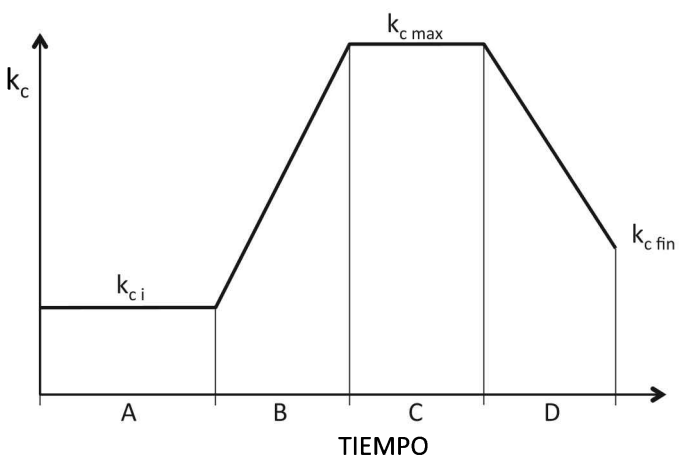


Figura 10.2. Curva de coeficiente de cultivo de una especie anual según el método de la FAO. La duración de las cuatro fases es 40, 30, 30 y 30 días, respectivamente.

de K_c para un cultivo anual en el que las duraciones de las fases son 40, 30, 30 y 30 días, y los coeficientes de cultivo que definen la curva son 0.3, 1.2 y 0.5. La Tabla 10.1 muestra los valores de K_{c2} (máximo) y K_{c3} (final) para un número de cultivos y en el Apéndice 10.3 se presenta una lista más completa.

Tabla 10.1. Duración de las fases del ciclo de crecimiento (método de la FAO) y coeficientes de cultivo en la fase C (máx) y en cosecha (fin) para diferentes especies cultivadas. Adaptado de Doorenbos y Pruitt (1977) y Allen et al. (1998). Para algunos cultivos el K_c final muestra un amplio intervalo, ya que su valor depende del aprovechamiento del cultivo (fresco o seco). Esta tabla debe utilizarse con precaución, ya que la duración real de las fases puede cambiar para diferentes regiones, cultivares y las condiciones climáticas de cada año.

Especie	Fecha comienzo (hemisferio N)	Duración de la fase (días)				Kc máx.	Kc fin
		A	B	C	D		
Alfalfa (heno)	Mar-Oct[a]	5	10-20	10	5-10	0.9 - 1.15[b]	0.90
Cebada	Nov-Mar	20 - 40	25 - 30	40 - 65	20 - 40	1.15	0.2-0.4
Judía grano (Phaseolus)	May-Jun	15-25	25-30	30-40	20	1.15	0.30
Cítricos (70% CC)*	Ene	60	90	120	95	0.65	0.75
Café						0.95	0.95
Algodón	Mar-May; Sept	30-45	50-90	45-60	45-55	1.15-1.25	0.4-0.7
Viñedo (mesa o pasas)	Mar-May	20	40-50	75-120	20-60	0.85	0.45
Viñedo (vino)	Abril	30	60	40	80	0.70	0.45
Lechuga	Nov-April	20-35	30-50	15-45	10	1.00-1.05	0.95
Maíz (grano)	Mar-Jun	20-30	35-50	40-60	30-50	1.20	0.35-0.6
Mijo	Abr-Jun	15-20	25-30	40-55	25-35	1.00	0.30
Olivo (60% CC)*	Mar	30	90	60	95	0.70	0.70
Palmera						1.00	1.00
Guisante seco	Mar-May	15-35	25-30	30-35	30	1.15	0.30
Frutales pepita, cerezo (60-70% CC)*	Mar	20-30	50-70	90-130	30-60	1.10	0.75
Patata	Nov-Ene; Apr-May	25-45	30-35	40-70	20-30	1.15-1.25	0.7-0.8
Colza	Nov-Dic	25-40	35-40	60-70	30-35	1.10	0.35

Arroz	May (Medit.); May-Dic (trópicos)	30	30	60-80	30-40	1.20	0.9-0.6
Sorgo (grano)	Apr-Jun	20	35	40-45	30	1.00-1.10	0.55
Soja	May-Jun; Dic (trópicos)	15-20	15-35	40-75	15-30	1.15	0.50
Frutales hueso (60-70% CC)*	Mar	21-30	51-70	91-130	31-60	1.10	0.65
Remolacha azucarera	Nov-Jun	25-50	30-75	50-100	10-65	1.20	0.70
Caña de azúcar (rebrote)		25-35	70-105	135-210	50-70	1.25	0.75
Caña de azúcar (virgen)		35-75	60-105	190-330	120-210	1.25	0.75
Girasol	Feb-May	25-45	35-40	45-60	25	1.20	0.35-0.5
Té						1.00	1.00
Tomate	Ene-May	30-35	40-45	40-70	25-30	1.15-1.25[c]	0.7-0.9
Trigo (invierno)	Oct-Dic	20-30	60-140	40-70	30	1.15	0.25-0.4

* Cuando hay malas hierbas o cubierta herbácea añadir 0.2 al coeficiente de cultivo. Si la cobertura del cultivo (CC) es menor que el valor indicado en la tabla (CC '), entonces Kc =0.15 + CC (Kc'-0.15)/CC' 'donde Kc' es el valor mostrado

a) para el primer ciclo de corte aumente al doble los valores mostrados

b) el valor más bajo es la media estacional; el más alto corresponde a cobertura completa justo antes del corte

c) para cultivo entutorado se debe aumentar $K_{c\ mid}$ en 0.05-0.1

Aunque la metodología propuesta por la FAO permite ajustar el coeficiente de cultivo a las condiciones climáticas específicas, en la Tabla 10.1 se muestran los intervalos de K_c que creemos que pueden ser válidos en zonas templadas. Por otra parte, la Tabla 10.1 también muestra los valores indicativos de las duraciones de las fases para diferentes especies. Estas duraciones deben tomarse sólo como ejemplos, ya que la duración real depende de muchos factores (zona climática, el cultivar, la fecha de siembra o de brotación en los cultivos leñosos, las condiciones climáticas del año, etc.). El factor principal que determina cambios en la duración de las fases del cultivo es la temperatura, que puede cambiar de un año a otro o si se cambia la fecha de siembra. Para la programación del riego en tiempo real, la curva de K_c siempre se debe basar en información real de las fases (inicio y duración) obtenida a partir de observaciones en el campo.

El K_c en la fase inicial (K_{c1}) es una función de la frecuencia de lluvias y de riegos y de la ET_0 durante ese período, ya que la mayor parte de la ET de un cultivo durante esta fase es evaporación directa desde la superficie del suelo. La evaporación del suelo desnudo es aproximadamente igual a la ET_0 mientras que la superficie del suelo esté húmeda (primera fase de evaporación, limitada por energía, ver apartado 9.3). A medida que el suelo se seca su conductividad hidráulica disminuye (segunda fase, limitada por el suelo). La importancia de E_s en la determinación del K_c inicial se manifiesta en variaciones significativas de la ET en las primeras etapas del ciclo de cultivo asociadas con la ocurrencia de lluvia o riego (Figura 10.3). Doorenbos y Pruitt (1977) propusieron un método de cálculo del K_c en la fase inicial (K_{c1}, hasta el comienzo del crecimiento rápido del cultivo) que se resume en las siguientes ecuaciones (Allen et al.,1998):

Para WI <4 días:

$$K_{c1} = (1.286 - 0.27 \ln WI)\, exp[(-0.01 - 0.042 \ln WI) ET_{01}] \tag{10.6a}$$

Para WI> 4 días:

$$K_{c1} = \frac{2}{(WI)^{0.49}}\, exp[(-0.02 - 0.04 \ln WI) ET_{01}] \tag{10.6b}$$

donde WI es el intervalo entre riegos o eventos de lluvia durante la etapa inicial y ET_{01} es la ET_0 media durante la etapa inicial (mm/día). Si tenemos en cuenta el efecto de las precipitaciones pueden surgir errores importantes si asumimos que los días de lluvia se distribuyen uniformemente a lo largo del período (Villalobos y

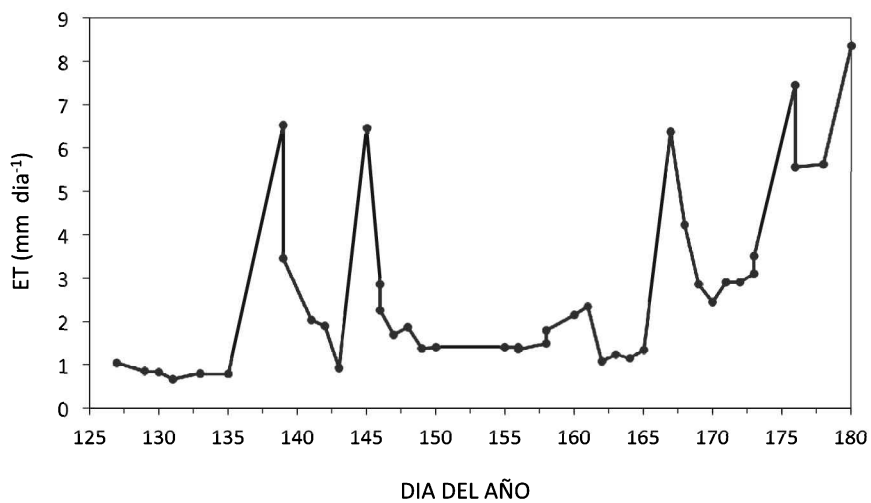


Figura 10.3. Evapotranspiración de un cultivo de algodón en Córdoba (España) durante las fases A y B. Se realizó una escarda entre líneas el día del año lo que provocó un aumento de la evaporación del suelo.

Fereres, 1989. Trans ASAE, 32 (1): 181-188), por lo que se debe aplicar una corrección para calcular el intervalo entre los eventos de lluvia (véase el ejemplo 9.4). Es importante calcular el K_c inicial con precisión ya que los errores cometidos en su determinación se traducen en errores en K_c durante el período de crecimiento rápido (fase B), ya que éste se determina por interpolación entre los valores de K_{c1} y K_{c2}.

Si disponemos de información en tiempo real de la fracción de cobertura del suelo (f_{GC}) podemos asignar valores de K_c considerando la proporcionalidad entre ellos. En las zonas áridas y semiáridas:

$$K_c = K_{c1} + f_{GC}\frac{K_{c2} - K_{c1}}{f_{GC2}} \tag{10.7}$$

donde f_{GC2} es la fracción de cobertura asociada a K_{c2} (f_{GC2} =1 para cultivos que alcanzan cobertura completa).

El método descrito anteriormente para el cálculo de los coeficientes de cultivo es válido para cultivos con buen suministro de agua, y por tanto, sería válido para cultivos de regadío o para cultivos de secano cuando el agua del suelo no limita la ET. Para secano o riego deficitario el cultivo reduce su transpiración cuando el agua en el suelo se agota por debajo de un umbral (estrés hídrico). En consecuencia, el K_c se reduce. Un modelo muy simple para estimar el K_c en función del contenido de agua del suelo sería:

$$K_c = K_c^* \frac{3(\theta - \theta_{PWP})}{(\theta_{FC} - \theta_{PWP})} \tag{10.8}$$

donde K_c^* es el coeficiente de cultivo sin estrés hídrico y θ es el contenido medio de agua del suelo. Esta ecuación es válida para θ menor que $\theta_{PWP} + (\theta_{FC} - \theta_{PWP})/3$. Si θ es mayor, entonces el K_c no se reduce, lo que implica que los cultivos pueden usar alrededor de 2/3 del agua extraíble sin sufrir una reducción de la ET.

10.4. COEFICIENTES DE CULTIVO DE ESPECIES PERENNES

Los cultivos forrajeros y los pastos tienen un K_c variable en función del manejo (frecuencia de corte, LAI máximo). Por ejemplo la alfalfa tiene un K_c medio estacional próximo a 1, oscilando entre 0.6 después de cortar hasta 1.2 antes del próximo corte.

Para árboles frutales la evaporación del suelo puede desempeñar un papel importante durante todo el ciclo lo que depende de la fracción del suelo que está expuesta a la radiación solar. Cuando las copas de los árboles son pequeñas, el K_c será mayor durante los periodos con alta frecuencia de precipitaciones. La contribución de la transpiración del árbol es proporcional a la fracción de suelo cubierto y será nula durante la temporada de invierno en frutales de hoja caduca, lo que contrasta con los árboles frutales de hoja perenne (olivo, cítricos) que mantienen su área

foliar durante todo el año. En estas especies de hoja perenne bajo climas mediterráneos, el K_c puede ser máximo en invierno (alta evaporación del suelo debido a la alta frecuencia de la lluvia) y mínimo durante el verano (bajo evaporación del suelo, alta resistencia de los estomas en respuesta al alto VPD) (Fig. 10.4).

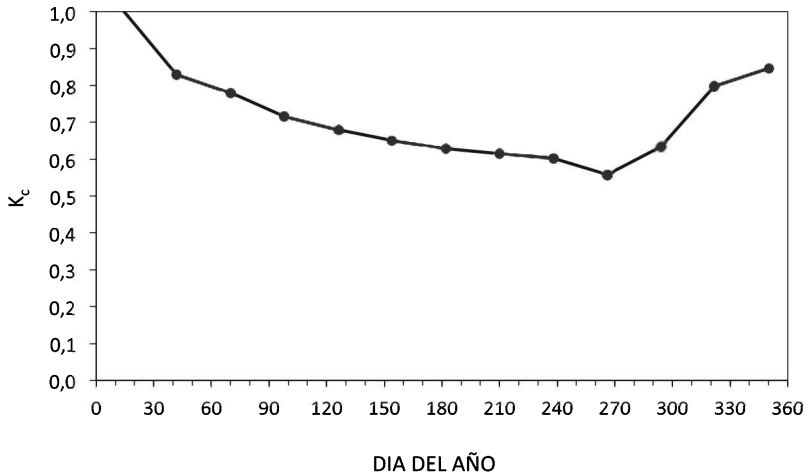


Figura 10.4. Coeficiente de cultivo medio de un olivar con 40% de cobertura en Córdoba (España) en 2001 y 2002. Los datos han sido agrupados en períodos de 4 semanas.

10.5. EVAPOTRANSPIRACIÓN EN INVERNADEROS

La evapotranspiración dentro de los invernaderos es por lo general menor que en el campo abierto, porque la cubierta reduce la radiación entrante, fuerza motriz de la ET, y la turbulencia. Se han desarrollado métodos específicos para calcular la ET de cultivos protegidos. En los invernaderos más sofisticados, como los utilizados para la producción de cultivos de alto valor o para la producción de plantas ornamentales, con control climático (frío/calor, luz suplementaria, etc.) se dispone de datos de muchos sensores que pueden alimentar modelos complejos de transpiración en intervalos de tiempo cortos (por ejemplo, 10 minutos). Por otra parte, el empleo adecuado de la información de los sensores puede proporcionar estimaciones indirectas de la ET del invernadero. Por ejemplo, las medidas de caudal de entrada de aire en el invernadero (Q_{in}, $m^3\ s^{-1}$) junto con sensores de temperatura y presión vapor en el aire que entra (T_{in}, e_{in}) y el que sale (T_{out}, e_{out}) permiten el cálculo de la ET (mm/hora) de un invernadero de superficie $A_g(m^2)$ como:

$$ET = \frac{Q_{in}}{A_g}\frac{3600}{0.4615}\left(\frac{e_{out}}{T_{out}} - \frac{e_{in}}{T_{in}}\right) \tag{10.9}$$

donde las temperaturas se expresan en K y las presiones de vapor en kPa.

Un caso muy distinto es el de los invernaderos sin calefacción con ventilación pasiva, típicamente con cubiertas de plástico, tales como los de la costa de Almería (España) y otras zonas de clima templado. Las condiciones en el interior del invernadero se caracterizan por la turbulencia reducida, mayor humedad y temperatura más alta que en el exterior. Esto en teoría conduce a la ET de equilibrio ET (ver ec. 9.17), es decir, la ET se rige por la radiación, una situación que ha sido confirmada empíricamente y que conduce a una ecuación para la evapotranspiración de referencia (ET_0, mm día^{-1}) de la forma:

$$ET_0 = \frac{1}{2.45}\, 0.68\, \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_{si} \tag{10.10}$$

donde R_{si} (MJ m^{-2} d^{-1}) es la radiación solar en el interior del invernadero, que también se puede estimar a partir de la radiación solar medida en el exterior si se conoce la transmisividad de la cubierta (τ), $R_{si} = \tau\, R_s$. Por ejemplo, la transmisividad de una lámina de polietileno de 0.2 mm es de alrededor de 0.7.

Una vez conocida la ET de referencia dentro del invernadero, el cálculo de la ET requiere un coeficiente de cultivo, que normalmente es algo más alto (10-20%) que el del mismo cultivo fuera. Por ejemplo, los valores medidos de K_c de tomate en invernadero alcanzan valores de 1.4 mientras que en campo abierto rara vez se excede de 1.2.

10.6. CÁLCULO DE LA ET MÁXIMA PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE RIEGO

La ET de un cultivo dado en una ubicación puede variar de un año a otro dependiendo de las condiciones meteorológicas. Para diseñar sistemas de riego sería deseable disponer de series históricas de ET (y precipitación) para determinar las necesidades de agua para diferentes niveles de probabilidad. A menudo, sólo conocemos la ET media del cultivo, que, obviamente, será superada en algunos años. Doorenbos y Pruitt (1977) propusieron un método de ajuste para el cálculo de la ET que corresponde a un nivel de probabilidad de 75% (ET_{75}, que será superada sólo el 25% de los años) como una función de la ET media (ET_{avg}) y de la dosis media aplicada en cada riego (I_a). El método se muestra en la Figura 10.5, donde se consideran cuatro tipos de clima diferentes. Cada línea se puede calcular como:

$$\frac{ET_{75}}{ET_{avg}} = C - 0.06\,(C-1)\sqrt{I_a} \tag{10.11}$$

donde I_a se da en mm y el coeficiente C es 1.21, 1.49, 1.33 y 1.43, para los tipos 1, 2, 3 y 4, respectivamente.

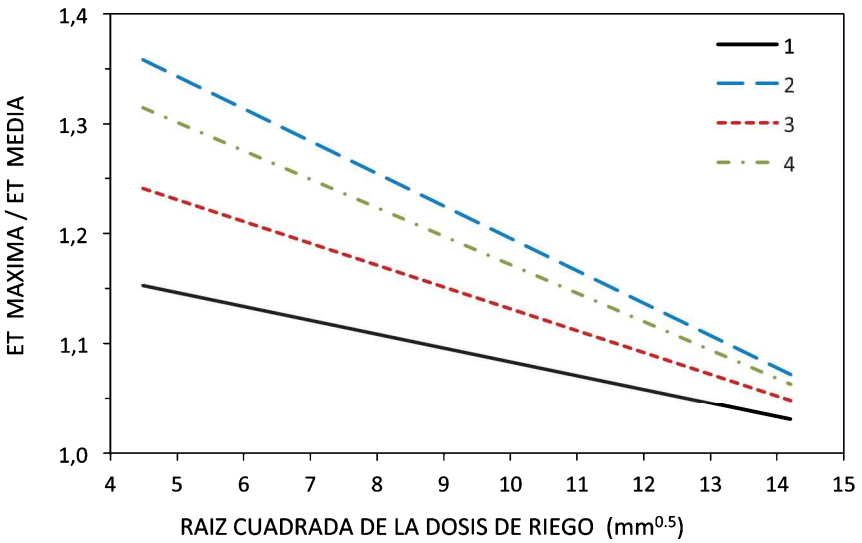


Figura 10.5. Ratio de ET para 75% de probabilidad y ET media en función de la raíz cuadrada de la dosis aplicada (mm) en cada evento de riego. Se consideran cuatro tipos de climas. 1: áridos y semiáridos, con cielos despejados durante el verano. 2: climas continentales en latitudes medias y climas sub-húmedos con nubosidad variable. 3: climas continentales en latitudes medias con ET hasta 5 mm/d. 4: climas continentales en latitudes medias con ET hasta 10 mm/d.

Se debe tener en cuenta que, idealmente, el sistema debe estar diseñado para suministrar un caudal pico correspondiente al período de mayor ET para el conjunto de cultivos existentes en la explotación o en la zona de riego. La decisión acerca del tamaño de la red de riego es básicamente económica, ya que la reducción del caudal por debajo de los requisitos máximos del año extremo con la distribución de cultivos más exigente requerirá menos inversión de capital pero aumentará los riesgos de déficit hídrico en algunos años. Además, si el sistema está dimensionado para cultivos anuales de necesidades bajas (por ejemplo, cereales de invierno), su conversión a cultivos de verano o perennes no es posible sin dejar algunas de tierras sin regar.

Ejemplo 10.1.

Vamos a calcular la ET de maíz durante agosto (K_c = 1,2) en Évora, Portugal (ET_0 = 7.0 mm/día) y París, Francia (ET_0= 4,0 mm/día) para el 75% de probabilidad suponiendo que se aplican dosis de riego de 60 mm.

Calculamos la ET media para las dos localidades:

Évora. ET = 1.2 x 7.0 = 8.4 mm d^{-1}

París. ET = 1.2 x 4.0 = 4.8 mm d^{-1}

Évora tiene un clima semiárido por lo que corresponde al tipo 1 (Fig. 10.5). París tiene un clima subhúmedo durante el verano (tipo 2). La aplicación de la ecuación 10.11 para Évora (C = 1.21) nos da:

$$\frac{ET_{75}}{ET_{avg}} = 1.21 - 0.06\,(1.21 - 1)\sqrt{60} = \ 1.11$$

Para París C = 1.49 así que:

$$\frac{ET_{75}}{ET_{avg}} = 1.49 - 0.06\,(1.49 - 1)\sqrt{60} = \ 1.26$$

Por lo tanto los valores de ET_{75} para las dos localidades serán:

Évora: ET_{75} = 1.10 x 8.4 = 9.2 mm/d

París : ET_{75} = 1.26 x 4.8 = 6.0 mm/d

10.7. CÁLCULO DE LAS NECESIDADES DE AGUA DE LOS CULTIVOS

La necesidad de agua de riego de un cultivo es la cantidad de agua que hay que suministrar para mantener un nivel máximo de ET, y se puede calcular a partir del balance de agua (Capítulo 8) como la diferencia entre la ET (el valor potencial, sin restricciones de ningún tipo) y el agua suministrada por la lluvia o extraída del suelo durante un período de tiempo determinado:

$$IWR_n = \ ET - P_e - \ (-\Delta TSWC) = \ ET - P_e \ + \ \Delta TSWC \tag{10.12}$$

Nótese que la extracción de agua del suelo se expresa como incremento en el contenido total de agua en el suelo con un signo negativo. En esta ecuación P_e es la precipitación efectiva, es decir, la precipitación que no se pierde por escorrentía o percolación profunda (ver Capítulo 8).

Podemos distinguir necesidad de agua neta y bruta. En el primer caso nos referimos a la cantidad de agua requerida suponiendo que no hay pérdidas durante el riego y que existe una perfecta uniformidad espacial en la distribución del agua de riego. En casi todos los casos estos supuestos no se cumplen y nos vemos obligados a aplicar más agua que el consumo de agua real del cultivo (Capítulo 19). La cantidad total a aplicar incluyendo el exceso de agua es la necesidad de agua de riego bruta (GIWR = requerimiento neto/eficiencia de aplicación).

El cálculo de IWR se puede realizar para diferentes intervalos de tiempo (semanas, meses) y para diferentes escalas espaciales (campo, explotación, zona regable). El primer paso es siempre calcular IWR en cada parcela y luego obtener la media ponderada utilizando las fracciones de área como coeficientes de ponderación.

El término relacionado con el almacenamiento de agua del suelo se omite frecuentemente en los cálculos de necesidades de agua lo que puede conducir a grandes sobreestimaciones de IWR en algunos casos. El agua almacenada en el suelo en la fecha de siembra depende de la recarga durante el periodo de barbecho desde la cosecha del cultivo anterior. Esta recarga se puede calcular mediante la adición de la precipitación efectiva y descontando la evaporación del suelo (ec. 9.6) durante el período de barbecho. La recarga, evidentemente, no puede exceder la capacidad de almacenamiento de agua del suelo (Capítulo 8). El agua almacenada en el suelo se ve en la agricultura de riego como un seguro contra los fallos del sistema de riego y períodos de ET extremadamente alta, por lo que manteniendo un nivel moderadamente alto de agua almacenada en el suelo durante gran parte de la campaña de riego se reducen los riesgos. Sin embargo, al final de la campaña el agua del suelo debe estar casi agotada, por lo que es posible utilizar una gran parte del agua almacenada en el suelo (por ejemplo, 80-90%) que debe ser descontada de las dosis de riego del período final (véase el Capítulo 20 sobre programación de los riegos).

Después de calcular IWR para cada cultivo de la finca se calcula el IWR promedio de la explotación como:

$$IWR_{farm} = \sum_{1}^{n} IWR_i \cdot s_i$$

donde n es el número de cultivos, e IWR_i y s_i son las necesidades de agua de riego y la fracción de área del cultivo i, respectivamente.

BIBLIOGRAFÍA

Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, Italy.

Cuenca RH (1989) Irrigation system design - an engineering approach. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA.

Doorenbos J, Pruitt WO (1977) Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper nº 24. FAO, Rome.

Ritchie JT (1972) Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. Water Resour Res, 8:1204-1213.

Apéndice 10.1. El tanque de evaporación clase A

Una forma relativamente sencilla de obtener la ET_0 es medir la evaporación de una superficie de agua libre en un dispositivo estandarizado y luego aplicar algunas relaciones empíricas para convertir la evaporación directa del agua a la de una superficie de césped. Este método se hizo muy popular en el pasado, ya que no requiere medidas tomadas en estaciones meteorológicas, por lo que es asequible para los agricultores, incluso en los países no desarrollados. Sin embargo, las correcciones que se aplican dependen también de la micrometeorología del lugar donde está instalado el tanque.

El modelo más popular de estos dispositivos es el del Servicio Meteorológico Nacional de los estados Unidos, el tanque clase A, que tiene un diámetro de 1.21 m y una altura de 0.254 m.

Normalmente el tanque se instala sobre una plataforma de madera fijada en el suelo. El tanque se llena con agua hasta 6 cm del borde superior e intenta representar una superficie de agua libre. La velocidad de evaporación se mide como la diferencia en el nivel del agua entre mediciones consecutivas.

La ET de referencia se puede calcular como:

$$ET_0 = K_p E_{pan} \tag{A10.1.1}$$

donde E_{pan} es la evaporación del tanque (mm/día) y K_p es el coeficiente de tanque que se encuentra en el rango 0.35-0.85 con un valor promedio de 0.75. El valor real dependerá del entorno del tanque, de la humedad relativa y de la velocidad del viento. Según el manual FAO 24, si el tanque está rodeado por cultivos, el coeficiente de tanque se puede calcular como:

$$K_p = 0.108 - 0.0286\,U + 0.0422\ln(X) + 0.1434\ln(RH) - 0.000631\,[\ln(X)]^2 \ln(RH) \tag{A10.1.2}$$

donde U es la velocidad del viento (m/s) a 2 m de altura, X es la distancia (m) con cultivos alrededor del tanque y RH es la humedad relativa media.

Si el tanque se encuentra en un lugar seco (suelo desnudo, rastrojo) el coeficiente de tanque se calcula como:

$$K_p = 0.61 + RH\,(0.00341 - 0.000162\,U) + U\,[0.00327\ln(X) - 9.59\,10^{-6}\,X] + [4.459 + \ln(U)][-0.0106\ln(X) + 0.00063\,[\ln(X)]^2 - 0.00289\,U] \tag{A10.1.3}$$

Una fórmula más simple, aunque menos precisa, puede aplicarse en ambos casos:

$$K_p = 0.85\,exp\left(-0.15\,\frac{2.45\,\cdot Epan}{R_n}\right) \tag{A10.1.4}$$

en la que R_n es la radiación neta calculada (MJ m^{-2} $día^{-1}$).

Apéndice 10.2. Cálculo de los coeficientes de cultivo siguiendo el modelo de Ritchie

Conforme crece un cultivo, la radiación interceptada aumenta y también lo hace la energía disponible para la transpiración. Al mismo tiempo, la energía disponible para la evaporación en la superficie del suelo disminuye. En 1972, el Profesor Joe T. Ritchie propuso un modelo para el cálculo de la ET de los cultivos mediante el cálculo por separado de la transpiración y la evaporación desde la superficie del suelo (Ritchie, 1972). Usando este modelo, el K_c se puede calcular en función de la cobertura del suelo y la frecuencia de humedecimiento del suelo.

Los resultados del modelo se resumen en la ec. A10.2.1 donde K_c es una función de ET_0, del intervalo entre los eventos de lluvia o riegos (WI) y de la fracción de suelo cubierta por el cultivo f_{GC}. Los valores más bajos de K_c lógicamente se producen cuando WI es grande y la ET_0 es alta, si f_{GC} es muy pequeña. Por el contrario, cuando f_{GC} es alta K_c varía poco con cambios en la ET_0 o WI.

$$K_c = 0.14 + 1.08\, f_{gc} + \frac{13.3 - 5.2\, f_{gc}}{WI\ ET_0} \qquad \text{(A10.2.1)}$$

Ejemplo 10.1.

Un cultivo de ajo en Marzo cubre el 30% del suelo. La última lluvia se produjo hace siete días. Desde entonces, la ET_0 media ha sido de 3.5 mm/día. Vamos a calcular el K_c durante ese período.

$$K_c = 0.14 + 1.08\, x\, 0.3 + \frac{13.3 - 5.2\, x\, 0.3}{7\, x\, 3.5} = 0.14 + 0.32 + 0.48 = 0.94$$

Apéndice 10.3. Coeficientes de cultivo en la fase C (máx.) y en cosecha (fin) para diferentes especies cultivadas. Adaptado de Doorenbos y Pruitt (1977) y Allen et al. (1998). Para algunos cultivos el Kc final muestra un amplio intervalo, ya que su valor depende del uso del cultivo (fresco o seco).

Cereales y similares	**Kc máx.**	**Kc fin**	**Altura máxima (m)**	**Profundidad radical máxima (m)**	**F_{AD}**
Cebada	1.15	0.2-0.4	1	1.0-1.5	0.09
Maíz (grano)	1.2	0.35-0.60	2	1.0-1.7	0.09
Maíz dulce	1.15	1.0-1.05	1.5	0.8-1.2	0.10
Mijo	1	0.3	1.5	1.0-2.0	0.09
Avena	1.15	0.2-0.4	1	1.0-1.5	0.09
Arroz	1.2	0.90-0.60	1	0.5-1.0	0.16
Centeno	1.15	0.2-0.4	1	0.9-2.3	0.08
Sorgo (grano)	1.00-1.10	0.55	1.0-2.0	1.0-2.0	0.09
Sorgo (dulce)	1.1-1.2	1.05	2.0-4.0	1.0-2.0	0.10
Trigo (primavera)	1.15	0.25-0.4	1	1.0-1.5	0.09
Trigo (invierno)	1.15	0.25-0.4	1	1.5-1.8	0.09
Forrajes	**Kc máx.**	**Kc fin**	**Altura máxima (m)**	**Profundidad radical máxima (m)**	**F_{AD}**
Alfalfa (heno)	0.9-1.15[a]	0.9	0.7	1.0-2.0	0.09
Grama (heno)	1	0.85	0.35	1.0-1.5	0.09
Grama (para semilla)	0.9	0.65	0.4	1.0-1.5	0.08
Trébol (heno)	0.9	0.85	0.6	0.6-0.9	0.10
Lolium (heno)	1.05	1	0.3	0.6-1.0	0.08
Pasto del Sudán (heno)	0.9	0.85	1.2	1.0-1.5	0.09
Pasto (pastoreo en rotación)	0.85-1.05	0.85	0.15-0.30	0.5-1.5	0.08
Pasto (pastoreo extensivo)	0.75	0.75	0.1	0.5-1.5	0.08
Césped (estación fría)	0.95	0.95	0.1	0.5-1.0	0.12
Césped (estación cálida)	0.85	0.85	0.1	0.5-1.0	0.10

Frutales, árboles y arbustos	Kc máx.	Kc fin	Altura máxima (m)	Profundidad radical máxima (m)	F_{AD}
Almendro (70% CC)*	1.1-1.2	0.65	5	1.0-2.0	0.12
Manzano (60-70% CC)*	1.1	0.75	4	1.0-2.0	0.10
Albaricoque (60-70%CC)*	1.1	0.65	3	1.0-2.0	0.10
Aguacate (70% CC)*	0.85	0.75	3	0.5-1.0	0.06
Platanera (año 1)	1.1	1	3	0.5-0.9	0.13
Platanera (año 2)	1.2	1.1	4	0.5-0.9	0.13
Bayas (arbustos)	1.05	0.5	1.5	0.6-1.2	0.10
Cacao	1.05	1.05	3	0.7-1.0	0.14
Cítricos (70% CC)*	0.65	0.75	3.0-4.0	1.0-1.5	0.10
Cerezo (60-70% CC)*	1.1	0.75	4	1.0-2.0	0.10
Café	0.95	0.95	2.0-3.0	0.9-1.5	0.12
Coníferas	0.9-1	0.9-1	10	1.0-1.5	0.06
Viñedo (uva mesa,pasas)	0.85	0.45	2	1.0-2.0	0.13
Viñedo (vino)	0.7	0.45	1.5-2	1.0-2.0	0.11
Kiwi	1.05	1.05	3	0.7-1.3	0.13
Olivo (60% CC)*	0.7	0.7	5-7	1.2-1.7	0.07
Palmera datilera	0.95	0.95	8	1.5-2.5	0.10
Palmera	1	1	8	0.7-1.1	0.07
Melocotón (60-70%CC)*	1.1	0.65	3	1.0-2.0	0.10
Pera (60-70% CC)*	1.1	0.75	4	1.0-2.0	0.10
Piña	0.3	0.3	0.6-1.2	0.3-0.6	0.10
Pistacho (60-70% CC)*	1.1	0.45	3-6	1.0-1.5	0.12
Ciruelo (60-70% CC)*	1.1	0.65	3	1.0-2.0	0.10
Árbol del caucho	1	1	10	1.0-1.5	0.12
Té (no sombreado)	1	1	1.5	0.9-1.5	0.12
Té (sombreado)	1.15	1.15	2	0.9-1.5	0.11
Nogal (70% CC)*	1.1	0.65	4-5	1.7-2.4	0.10

Cultivos hortícolas	Kc máx.	Kc fin	Altura máxima (m)	Profundidad radical máxima (m)	F_{AD}
Alcachofa	1	0.95	0.7	0.6-0.9	0.11
Espárrago	1	0.3	0.2-0.8	1.2-1.8	0.11
Judía (verde)	1.1	0.95	1.5	0.5-0.7	0.11
Remolacha (mesa)	1.1	0.95	0.2	0.6-1.0	0.10
Brócoli	1.05	0.95	0.3	0.4-0.6	0.11
Col de Bruselas	1.05	0.95	0.4	0.4-0.6	0.11
Repollo	1-1.1	0.9-1	0.4	0.5-0.8	0.11
Zanahoria	1.05	0.95	0.3	0.5-1.0	0.13
Coliflor	1.05	0.95	0.4	0.4-0.7	0.11
Apio	1.05	1	0.6	0.3-0.5	0.16
Pepino	1	0.75-0.9	0.3	0.7-1.2	0.10
Berengena	1.05	0.9	0.8	0.7-1.2	0.11
Haba (verde)	1.1	0.9		0.5-0.7	0.11
Lechuga	1-1.05	0.95	0.3	0.3-0.5	0.14
Melón	1.05-1.1	0.7-0.75	0.4	0.8-1.5	0.12
Melón (Cantaloupe)	0.85	0.6	0.3	0.9-1.5	0.11
Menta	1.15	1.1	0.6-0.8	0.4-0.8	0.12
Guisante (fresco)	1.2	1	0.7	0.6-1.0	0.13
Pimiento	1.05-1.15	0.70-0.90	0.7	0.5-1.0	0.14
Calabaza	1	0.8	0.4	1.0-1.5	0.13
Rábano	0.9	0.85	0.3	0.3-0.5	0.14
Espinaca	1	0.95	0.3	0.3-0.5	0.16
Calabacín	0.95-1.0	0.75-0.9	0.3	0.6-1.0	0.10
Fresa	0.85	0.75	0.2	0.2-0.3	0.16
Tomate	1.15-1.25[b]	0.70-0.90	0.6	0.7-1.5	0.12
Sandía	1	0.75	0.4	0.8-1.5	0.12

Leguminosas	Kc máx.	Kc fin	Altura máxima (m)	Profundidad radical máxima (m)	F_{AD}
Judías (Phaseolus)	1.1-1.25	0.3-0.9	0.4	0.6-0.9	0.11
Judía de Lima (garrofón)	1.1	0.5	0.5	0.8-1.2	0.11
Garbanzo	1	0.35	0.4	0.6-1.0	0.10
Haba	1.15-1.25	0.3-1.1	0.8	0.5-0.7	0.11
Caupí	1.05	0.3-0.6	0.4	0.6-1.0	0.11
Cacahuete	1.15	0.6	0.4	0.5-1.0	0.10
Lenteja	1.1-1.2	0.3-0.5	0.5	0.6-0.8	0.10
Guisante	1.15	0.3-1.1	0.5	0.6-1.0	0.12
Soja	1.15-1.25	0.5	0.5-1.0	0.6-1.3	0.10
Raíces, tubérculos y bulbos	**Kc máx.**	**Kc fin**	**Altura máxima (m)**	**Profundidad radical máxima (m)**	**F_{AD}**
Mandioca (año 1)	0.8	0.3	1	0.5-0.8	0.13
Mandioca (año 2)	1.1	0.5	1.5	0.7-1.0	0.12
Ajo	1-1.2	0.7-1.05	0.5	0.3-0.5	0.14
Cebolla	1-1.1	0.75-1	0.3-0.5	0.5-0.8	0.14
Chirivía	1.05	0.95	0.4	0.5-1.0	0.12
Patata	1.15-1.25	0.70-0.80	0.6	0.4-0.6	0.13
Remolacha azuc.	1.2	0.7	0.5	0.7-1.2	0.09
Boniato	1.15	0.65	0.4	1.0-1.5	0.10
Nabo	1.1	0.95	0.6	0.5-1.0	0.10
Cultivos para azúcar, aceite y fibra	**Kc máx.**	**Kc fin**	**Altura máxima (m)**	**Profundidad radical máxima (m)**	**F_{AD}**
Algodón	1.15-1.25	0.4-0.7	1.2-1.5	1.0-1.7	0.07
Ricino	1.15	0.55	0.3	1.0-2.0	0.10
Lino	1.1	0.25	1.2	1.0-1.5	0.10
Lúpulo	1.05	0.85	5	1.2	0.10
Colza	1.1	0.35	0.6	1.0-1.5	0.08
Cártamo	1.1	0.25	0.8	1.0-2.0	0.08

Sésamo	1.1	0.25	1	1.0-1.5	0.08
Sisal	0.4-0.7	0.4-0.7	1.5	0.5-1.0	0.04
Caña de azúcar	1.25	0.75	3	1.2-2.0	0.07
Girasol	1.2	0.35-0.5	2	0.8-1.5	0.11
Tabaco	1.15	0.8	1.5-2.0	0.8	0.10

* Cuando existe cubierta herbácea o malas hierbas añadir 0.2 al coeficiente de cultivo. Si la cobertura del dosel (CC) es menor que el valor indicado en la tabla (CC '), entonces Kc =0.15 + CC (Kc'-0.15)/ CC' donde Kc'es el valor mostrado. También se muestran valores indicativos de altura máxima y profundidad máxima de las raíces. El factor F_{AD} se utiliza para el cálculo del agotamiento permisible (véase el Capítulo 20).

a) el valor más bajo es la media estacional; el más alto corresponde a cobertura completa justo antes del corte

b) para cultivo entutorado se debe aumentar $K_{c\ mid}$ en 0.05-0.1

Capítulo 11

El desarrollo y el crecimiento de los cultivos

V.O. SADRAS
F.J. VILLALOBOS
E. FERERES

RESUMEN:

El crecimiento de los cultivos, las plantas o las distintas partes de las plantas se define como el aumento irreversible de su tamaño mientras que el desarrollo es el cambio continuo de la planta en su forma y/o su función con fases de transición características. El crecimiento se asocia principalmente con la captura y distribución de recursos, mientras que el desarrollo se relaciona principalmente con las señales ambientales tales como la temperatura, el fotoperiodo y la calidad de la luz. Distinguimos el desarrollo y el crecimiento desde un punto de vista conceptual, pero ambos procesos están estrechamente vinculados. El tiempo térmico y las variaciones de tiempo térmico corregidas para tener en cuenta el fotoperiodo y la vernalización son útiles para modelar el desarrollo fenológico de los cultivos. El desarrollo de los cultivos, en particular el tiempo hasta la floración, es uno de los rasgos más importantes para su adaptación. Los mejoradores, los agrónomos y los agricultores entienden la importancia de ajustar el patrón de desarrollo fenológico a sus entornos particulares, y usan una combinación de herramientas genéticas y agronómicas para manipular el desarrollo. El crecimiento de los cultivos depende de su capacidad para capturar CO_2 y radiación, de la capacidad del sistema radical para extraer el agua y los nutrientes del suelo, y de la eficiencia del cultivo para transformar los recursos (agua, nutrientes, radiación, dióxido de carbono) en materia seca. Los estreses tales como el déficit de agua o la compactación del suelo reducen el crecimiento mediante la reducción de la cantidad de recursos capturados por el cultivo, de la eficiencia en el uso de recursos o de la reducción de ambas.

11.1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento de los cultivos, de las plantas o de sus partes se define como el aumento irreversible en tamaño mientras que el desarrollo es el cambio continuo de la planta en su forma y/o función, con fases de transición característicos. La expansión de una hoja o la acumulación de biomasa del cultivo son procesos típicos de crecimiento, mientras que la transición de un meristemo vegetativo, que genera hojas, a un meristemo reproductivo en el que se producen flores es un proceso de desarrollo característico. Distinguimos desarrollo morfológico (por ejemplo, aparición de estructuras sucesivas en la planta) de desarrollo fenológico o fásico que se refiere a la duración de las diferentes fases del ciclo del cultivo.

La distinción entre el crecimiento y el desarrollo es importante por dos razones. En primer lugar, el crecimiento se asocia principalmente con la captura y asignación de recursos, mientras que el desarrollo se relaciona principalmente con señales ambientales que no son recursos sino reguladores, tales como la temperatura, el fotoperiodo y la calidad de la luz. En segundo lugar, los procesos fisiológicos involucrados son diferentes, como se analiza en este capítulo. Aunque separemos el crecimiento y el desarrollo por una cuestión conceptual, los órganos, las plantas y los cultivos crecen y se desarrollan de forma simultánea, y para muchos rasgos de importancia agronómica los límites entre el crecimiento y el desarrollo no están claros. Por ejemplo, un grano de trigo crece, es decir, se expande en volumen y aumenta su masa, pero también se desarrolla, por ejemplo, al diferenciarse primordios de hojas y raíces en el embrión. La biología del desarrollo (Recuadro 11.1) y el análisis de crecimiento de los cultivos son, pues, distintas perspectivas que sustentan la investigación del desarrollo y el crecimiento. En este capítulo, se describen aspectos de importancia agronómica de estos procesos.

Recuadro 11.1. Biología del desarrollo

La cuestión fundamental de la biología del desarrollo es la siguiente: ¿cómo diferentes fenotipos celulares surgen a partir de células que comparten un conjunto común de genes? Una angiosperma típica tiene 30 tipos diferentes de células, mientras que un vertebrado típico tiene alrededor de 120 tipos de células. Toda esta diversidad tiene que ser explicada en términos de expresión diferencial de genes, ya que los 30 o más tipos de células comparten el mismo genoma - genéticamente, las células de la endodermis de la raíz del trigo y las células del mesófilo de la hoja bandera de la misma planta son esencialmente idénticas. Del mismo modo, las neuronas y las células del hígado son genéticamente idénticas, pero su forma y fisiología son obviamente diferentes. Para los lectores interesados en esta cuestión, se recomienda el libro de Mary Jane West-Eberhard: Developmental plasticity and evolution (Oxford University Press, 2003).

Algunos ejemplos demuestran las consecuencias prácticas de la comprensión del proceso de la diferenciación celular. Las células madre, que son células indiferenciadas con potencial para generar cualquier tipo de célula, presentan grandes oportunidades de

nuevas terapias para humanos y otros animales. El acortamiento del tiempo entre generaciones es una de las piedras angulares de los programas de mejora vegetal exitosos. Haciendo uso de un conocimiento avanzado de la diferenciación celular y el cultivo de tejidos, los mejoradores actualmente pueden criar hasta seis generaciones de garbanzos en un solo año. Del mismo modo, el cultivo de tejidos, explotando los principios de la diferenciación celular, es un método rápido, eficaz y barato para generar plantas libres de virus de alto valor en horticultura.

11.2. DESARROLLO FENOLÓGICO

Se han ideado escalas para caracterizar el desarrollo fenológico de los cultivos anuales y perennes. Se basan en el concepto de estadíos fenológicos. Los principales estadíos en cultivos anuales incluyen:

1. Siembra
2. Germinación
3. Emergencia
4. Fase juvenil/Iniciación de hojas
5. Iniciación floral (formación de primordios de las estructuras reproductivas)
6. Floración
7. Madurez fisiológica
8. Madurez de cosecha

El caso de las especies perennes es más complejo. Los árboles se mantienen en fase juvenil, incapaces de florecer, durante varios años después de la germinación de la semilla. Sin embargo, la mayoría de los árboles de interés agrícola no se propagan por semillas, sino vegetativamente a partir de esquejes que se enraízan en los viveros. En este caso, si el esqueje no es juvenil se reduce el tiempo hasta que el árbol es capaz de florecer. En algunas especies de árboles, el crecimiento del tallo principal más allá de una cierta longitud acelera el final del periodo juvenil. Una vez que la fase juvenil ha terminado, el árbol sigue ciclos anuales que se asemejan a los de una planta anual, siguiendo dos estrategias posibles:

a) Especies caducifolias: La mayoría de los árboles frutales y las viñas pertenecen a esta categoría. Todas las hojas caen en otoño-invierno, en respuesta a las bajas temperaturas y/o fotoperiodo corto. Las yemas permanecen en estado latente durante el invierno y generalmente requieren temperaturas más bajas durante un período prolongado (requerimiento de frío) hasta que son capaces de responder positivamente a la temperatura y se produce la brotación. Después, el crecimiento vegetativo y reproductivo ocurrirán con un grado de solapamiento que depende de la especie. Por ejemplo, la floración puede ocurrir

antes de que comience el crecimiento foliar (frutas de hueso, como por ejemplo, el melocotonero) o posteriormente (frutales de pepita como el manzano), mientras que la cosecha se puede producir a principios o mediados del verano (varios meses antes de la caída de hojas, como en la cereza) o al final del verano o inicio de otoño (p.ej. manzano).

b) Especies de hoja perenne: Incluyen los cítricos, el olivo y los árboles frutales tropicales (p.ej. mango). Las hojas permanecen en el árbol durante largos períodos de tiempo (2-3 años). En algunos casos (p.ej. olivo) el árbol permanece inactivo (sin crecimiento vegetativo) durante el invierno y reanuda el crecimiento en la primavera.

El período entre dos estadíos fenológicos constituye una fenofase; nos puede interesar, por ejemplo, la fase siembra-emergencia o la fase emergencia-floración. Algunas de estas fases están bien definidas biológicamente, por ejemplo, la fase entre la iniciación floral y la floración. Otras fases o estadíos no están definidos biológicamente sino mediante criterios agronómicos; por ejemplo, el estadío de madurez fisiológica, cuando el grano alcanza su máximo de materia seca, o la madurez de cosecha, cuando los granos alcanzan un grado de humedad adecuado para la recolección mecanizada. La madurez de cosecha de las uvas de vino se define por criterios enológicos, incluyendo la concentración de azúcares y la acidez, y los rasgos complementarios, tales como el color y los aromas. La relación azúcar:ácido es una característica importante para la decisión de la cosecha en la mayoría de frutales.

La duración del ciclo de diferentes especies cultivadas se muestra en el Apéndice 11.1. Todos los estadios fenológicos son sensibles a la temperatura, que es la principal influencia del ambiente en el desarrollo (Recuadro 11.2). La fase siembra-emergencia puede ser también afectada por el contenido de agua y oxígeno en el suelo. En algunas especies, el fotoperiodo también afecta a la duración de algunas fases fenológicas. Algunas especies y fases también son sensibles a la temperatura baja en un proceso llamado vernalización. A continuación describimos los efectos de la temperatura media, las bajas temperaturas (vernalización) y el fotoperíodo en el desarrollo fenológico.

Recuadro 11.2. La fenología y el calentamiento global

Los cambios fenológicos son la señal biológica más conspicua del calentamiento global. A partir de una red sistemática de observación fenológica con más de 125 000 series de datos de 542 especies de plantas y 19 de animales en 21 países europeos entre 1971 y 2000, se encontró que en el 78% de los casos se adelantaron la brotación de hojas, la floración y la fructificación (el 30% significativamente) y en el 3% de los casos se retrasaron significativamente.

Las consecuencias del calentamiento para la agricultura son muy variados. En latitudes altas, el calentamiento está extendiendo el período útil para los cultivos, con implicaciones positivas en general para la producción agrícola. En China y EE.UU., los inviernos ▶

más suaves están permitiendo el adelanto de la siembra, lo que combinado con nuevas variedades y prácticas culturales está mejorando el rendimiento de los cultivos. Las proyecciones climáticas y los modelos indican que la productividad de los cultivos de Finlandia en 2050 podría estar cerca de la productividad actual de Dinamarca. En 2000, la UE ha aceptado a Dinamarca como país productor de vino, y la Asociación de Viticultores danesa cuenta ahora con más de 1400 miembros. En ambientes templados como las Pampas, el calentamiento en los últimos decenios ha acortado los ciclos del trigo, lo que permite la siembra temprana y el mayor rendimiento de la soja en el cultivo doble trigo/soja. En ambientes templados y subtropicales, el calentamiento acorta el ciclo, lo que reduce el rendimiento potencial en ausencia de prácticas de adaptación. El aumento de la frecuencia y la incidencia de olas de calor pueden reducir tanto el rendimiento como la calidad de los cultivos. Por lo tanto, los efectos del calentamiento son complejos y variados, sobre todo cuando el calentamiento interactúa con los cambios en las precipitaciones, pero una buena parte de la respuesta del cultivo al calentamiento están relacionados con cambios fenológicos.

Otra consecuencia interesante del calentamiento es el desacoplamiento de los procesos, desde el nivel de ecosistemas al molecular. En las últimas cinco décadas, la productividad de las pesquerías del Mar del Norte ha disminuido. La razón principal es que el calentamiento ha "desacoplado" la fenología de los componentes de la cadena trófica. Esto significa que, por ejemplo, los depredadores y las presas cuyas fenologías estaban sincronizadas están ahora fuera de fase, con consecuencias directas para la estructura y el funcionamiento de todo el ecosistema. En las variedades de vid tinta, el calentamiento provoca el desacoplamiento de los azúcares y las antocianinas. Esto significa que la fruta llega a la madurez de azúcar con menos pigmentación; los productores tienen por lo tanto dos opciones. Pueden esperar más tiempo para cosechar, para que el color se desarrolle lo que conduce a azúcar y concentración de alcohol demasiado altos. O pueden cosechar según cuando el nivel de azúcar es el adecuado, y corregir la falta de color en la bodega. Por consiguiente, el proceso de desacoplamiento es una consecuencia del calentamiento de importancia agronómica, que está relacionado con los procesos de desarrollo y de crecimiento.

11.2.1. Efectos de la temperatura media diaria

La Figura 11.1 muestra la relación entre la tasa diaria de desarrollo fenológico (R, unidades día^{-1}) y la temperatura media diaria (T, en ºC). La tasa diaria de desarrollo es la inversa de la duración de la fenofase (D, en días); por ejemplo, si se necesitan 10 días para completar la fase siembra-emergencia, la tasa diaria de desarrollo es de 0.1 día^{-1}. La tasa de desarrollo aumenta linealmente con la temperatura entre la temperatura base (T_b) y la temperatura óptima (T_o) y disminuye entre la temperatura óptima y la máxima para el desarrollo (T_m). Estos tres parámetros, T_b, T_o y T_m son las llamadas temperaturas "cardinales" para el desarrollo, y dependen de la especie y la fase fenológica.

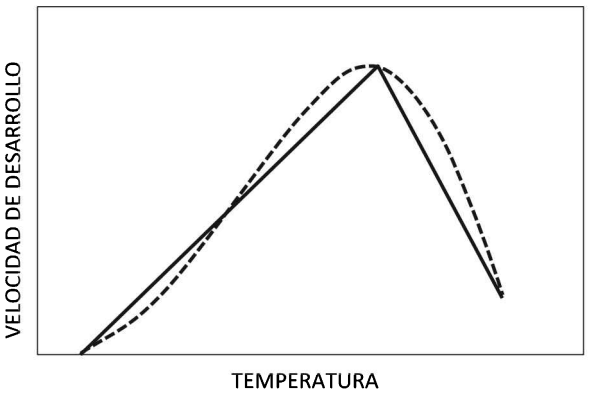


Figura 11.1. Respuesta de la tasa de desarrollo a la temperatura. La línea de trazos representa la respuesta real, mientras que la línea continua es una aproximación lineal.

La tasa diaria de desarrollo se supone que es cero (es decir, la planta no se desarrolla) si la temperatura media está por debajo de T_b o por encima de T_m. El concepto de "tiempo térmico" (también llamado grados-día o unidades de calor) es útil para predecir la duración de una fase para diferentes temperaturas. El tiempo térmico (TT, en ºC d) se define como la suma de la temperatura media diaria (T, ºC), por encima de la temperatura base, desde el principio hasta el final de la fase; por ejemplo, para la fase siembra-emergencia:

$$\mathrm{TT} = \sum_{siembra}^{emergencia} (\mathrm{T} - T_b) \tag{11.1}$$

y la tasa diaria de desarrollo, cuando la temperatura media diaria está entre T_b y T_o, es:

$$\mathrm{R} = 1/\mathrm{D} = (\mathrm{T}\text{-}\mathrm{T_b})/\ \mathrm{TT} \tag{11.2a}$$

La duración de una fase por lo tanto se puede calcular si se conoce la temperatura media diaria, la temperatura base y el tiempo térmico requerido para completar la fase:

$$\mathrm{D} = \mathrm{TT} / (\mathrm{T}\text{-}\mathrm{T_b}) \tag{11.2b}$$

La Tabla 16.1 en el capítulo 16 muestra la temperatura base y el tiempo térmico de la fase siembra-emergencia para un número de cultivos. Con suministro adecuado de agua y oxígeno, el tiempo térmico requerido para completar la fase es aproximadamente constante. Por lo tanto, podemos predecir que el trigo necesita aproximadamente 11 días para emerger a una temperatura media de 10ºC (D = 110/(10-0)) y 7 días si la temperatura media es de 15ºC ya que D = 110/(15-0).

Las temperaturas base tienen significado fisiológico y ecológico, ya que reflejan las diferencias entre las especies y las etapas del desarrollo, y contribuyen al acoplamiento de los organismos en las cadenas tróficas. Por ejemplo, la temperatura

base para la fase de siembra-emergencia es mucho más baja para los cultivos de invierno que para los cultivos sembrados en primavera (Tabla 16.1). La temperatura base normalmente disminuye a lo largo del ciclo en los cultivos de verano (p.ej. girasol, soja), mientras que aumenta en cultivos de invierno, como el trigo. El modelo de tiempo térmico se aplica no sólo a las plantas sino también a otros organismos, incluyendo los insectos que son –como las plantas– incapaces de regular la temperatura corporal. La temperatura base para la aparición de gusanos del algodón después de invernar en el suelo es muy próxima a la temperatura base para la fase de siembra-emergencia del algodón; esta coincidencia de las temperaturas base asegura que una nueva generación de insectos emerja en sincronía con una fuente de alimento adecuado.

El modelo de tiempo térmico (Ec. 11.2) es una simplificación de una respuesta más compleja del desarrollo a la temperatura, ya que se basa en la suposición de una relación lineal entre la tasa de desarrollo y la temperatura. Sin embargo, por encima de la temperatura óptima, la velocidad de desarrollo disminuye al aumentar la temperatura, hasta que se alcanza una temperatura máxima (Fig. 11.1). Para algunas fenofases, particularmente las relacionadas con la reproducción, el desarrollo también es sensible a la vernalización y al fotoperiodo. En estos casos, el tiempo térmico requerido para completar la fase no es constante, siendo influenciado por las bajas temperaturas y la duración del día.

11.2.2. Vernalización y fotoperiodo

Los cultivos anuales tienen ventanas específicas de desarrollo, en las que el número de granos, el principal componente del rendimiento, se ve más afectado por los estreses ambientales como las heladas, el calor o el déficit hídrico (Fig. 11.2). Estas ventanas varían, pero están más o menos centradas en torno a la floración para la mayoría de los cultivos. Por esta razón, han ido apareciendo mecanismos que reducen la probabilidad de coincidencia de estrés severo con las etapas de desarrollo más sensibles. Estos mecanismos se basan en dos señales ambientales: la vernalización y el fotoperiodo. El tiempo hasta floración es de hecho uno de los rasgos más importantes para la adaptación de los cultivos a los ambientes particulares en los sistemas agrícolas. Consideremos por ejemplo el trigo en una región mediterránea. Si florece demasiado pronto, el alto riesgo de heladas reduciría la producción de semillas en una serie de años. Si florece demasiado tarde, el riesgo de heladas se reduce a expensas de un mayor riesgo de estrés por calor y falta de agua. Las primeras variedades de trigo introducidas en Australia llegaban a floración 125 días después de la siembra, lo que aumentaba la exposición de la ventana sensible de reproducción a una alta frecuencia de estrés por calor y sequía. Reconociendo este problema, los mejoradores seleccionaron variedades de ciclo más corto, que se adaptan mejor a su entorno. En una comparación en las mismas condiciones ambientales, el tiempo desde siembra hasta antesis fue 119 días para los cultivares aparecidos antes de 1950 y 108 días para los cultivares posteriores. El girasol de secano en el sur de España crece gracias al agua almacenada en el suelo que se agota durante la estación de crecimiento. En estos entornos, los híbridos con ciclo

muy largo pueden agotar las reservas de agua del suelo durante la fase vegetativa, sufriendo por tanto un déficit de agua más fuerte durante el llenado del grano que los híbridos de ciclo corto. Para manipular el momento de ocurrencia de los eventos fenológicos clave, los mejoradores de plantas hacen uso de la comprensión genética fundamental que incluye la manipulación de los genes de vernalización y fotoperiodo en la selección de variedades adaptadas a entornos particulares. Por su parte, para cambiar los eventos fenológicos clave, los agricultores combinan dos prácticas: la elección de la variedad y la fecha de siembra.

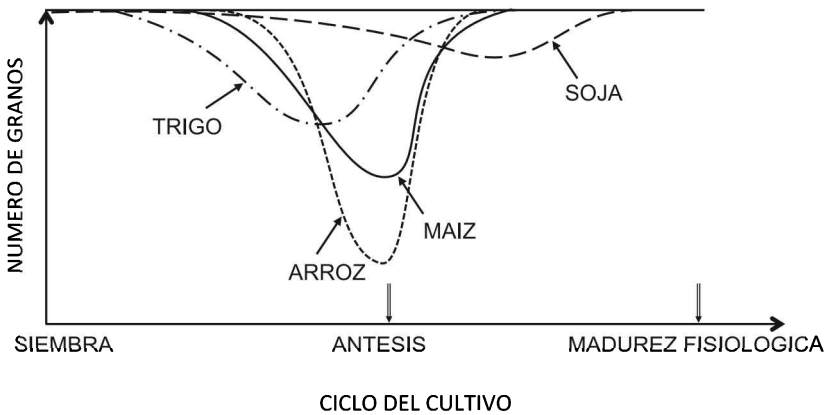


Figura 11.2. Período crítico para la determinación del número de granos, el principal componente del rendimiento de los cultivos anuales. El número de granos se presenta en una escala arbitraria, donde la línea vertical representa el 100%, del número de granos en ausencia de estrés. Las desviaciones de esta línea representan reducciones debidas al estrés en diferentes periodos del ciclo de cultivo. Adaptado de Calviño PA, Monzon JP (2009) Farming systems of Argentina: yield constraints and risk management. In: Sadras VO, Calderini DF (eds) Crop physiology: applications for genetic improvement and agronomy. Academic Press, San Diego, pp 55-70

La vernalización es una respuesta a las bajas temperaturas necesarias para que algunas plantas se conviertan en competentes para la transición a la fase reproductiva. El ápice de la planta puede percibir temperaturas vernalizantes desde la imbibición de la semilla y a lo largo de la fase vegetativa. Las necesidades de vernalización son características de cultivos de clima templado como el trigo, la cebada, las Brassicas y los guisantes. En muchas de estas especies, los tipos de invierno requieren vernalización mientras que los de primavera tienen poca o ninguna necesidad de vernalización. Por ejemplo, para el trigo de invierno, las temperaturas entre 0 y 8ºC son los más eficaces, aunque la vernalización sucede con temperaturas hasta 15ºC. La vernalización puede revertirse por las altas temperaturas (normalmente> 20ºC), en un proceso conocido como desvernalización. En algunas especies, la vernalización se combina con la respuesta al fotoperiodo para modular la época de floración.

La vernalización es también importante en cultivos hortícolas. En las plantas bienales como la remolacha y la zanahoria, la vernalización modula el desarrollo de las yemas florales en el segundo año de crecimiento. En las plantas perennes que flore-

cen antes de producir hojas la vernalización modula el tiempo a floración. En la horticultura, el requisito de vernalización también se conoce como "horas de frío", que es el tiempo por debajo de una temperatura base específica de la especie. La comprensión de los requerimientos de vernalización es importante para determinar los límites geográficos y los riesgos de la producción de cultivos particulares. El manzano, por ejemplo, tiene un alto requerimiento de vernalización, por lo tanto no puede cultivarse con éxito en zonas de invierno templado. Los almendros tienen unas necesidades de vernalización relativamente bajas, lo que implica el riesgo de floración temprana, y la consiguiente pérdida de rendimiento por las heladas. Los mejoradores han seleccionado plantas perennes hortícolas con una amplia gama de requerimientos de vernalización para extender sus áreas de cultivo y reducir los riesgos de pérdida de cosechas.

Prácticamente en todas las especies se pueden encontrar genotipos sensibles al fotoperiodo, o más bien, a la duración de la noche. Gardner y Allard clasificaron las especies anuales en dos categorías: plantas de día largo y plantas de día corto. Las plantas de día corto aceleran su desarrollo (acortan el tiempo a floración), cuando los días son cortos, mientras que las plantas de día largo se desarrollan más rápido si los días son largos.

Los cereales de grano pequeño (trigo, cebada, avena y centeno) son especies de día largo, mientras que el maíz, el arroz, el sorgo y la soja son especies de día corto. Sin embargo, dentro de cada especie existe a menudo una gran variabilidad en la sensibilidad al fotoperiodo. En general la respuesta fotoperiodo es cuantitativa, es decir, la tasa de desarrollo aumenta o disminuye con el fotoperiodo pero nunca se convierte en cero, lo que sería una respuesta cualitativa. Mediante la manipulación de los genes de fotoperiodo en la soja, se han desarrollado variedades que se pueden cultivar desde las latitudes altas del hemisferio norte hasta las zonas tropicales; un sistema de clasificación de los tipos de madurez, siendo 00 el más corto (90 días) y VIII el más largo (190 días) muestra la amplia gama de patrones fenológicos de soja.

11.3. DESARROLLO MORFOLÓGICO

La arquitectura de la planta está bajo control genético, y es modulada por factores ambientales como la temperatura, el fotoperiodo, y la calidad de la luz. Agronómicamente, la arquitectura del cultivo es importante porque influye en rasgos tales como el encamado, aptitud para la cosecha, la competencia con las malas hierbas, las respuestas al consumo por herbívoros y la distribución de la luz y productos químicos en la cubierta. La introducción de genes de semi-enanismo en el arroz y el trigo ha dado lugar a mejoras significativas en la producción de estos cultivos, y parte del éxito de estos cultivos semi-enanos está relacionada con su mejor arquitectura, que permite una mayor absorción de nutrientes con un riesgo reducido de encamado. El nudo en el que se establece la primera vaina es un rasgo importante de las leguminosas de grano, por lo que los genotipos con vainas demasiado cerca del suelo no se pueden cosechar de manera efectiva.

Las plantas tienen numerosas meristemos (yemas) que pueden seguir uno de tres destinos: permanecer en estado latente, activarse para producir estructuras vegetativas, o convertirse en estructuras reproductivas. Las diferentes especies combinan diferentes estrategias de asignación de meristemos, y estas estrategias implican contrapartidas. Por ejemplo, la adaptación de las gramíneas al pastoreo, y su explotación en la agricultura, está directamente relacionada con la existencia de meristemos subterráneos latentes que permiten volver a crecer después de ser defoliadas por el ganado. Las plantas con ramificación o ahijado profuso son más capaces de llenar los huecos originados, por ejemplo, por fallos en la siembra o daños por plagas o enfermedades. Como un ejemplo de contrapartida, la fuerte dominancia apical, con lo que la mayoría de los brotes laterales están latentes, favorece el crecimiento en altura, la competencia por la luz, y la capacidad de recuperarse después del consumo por herbívoros, a expensas de la capacidad limitada para el crecimiento y la reproducción, y la ocupación de huecos que se generen en la cubierta.

Las interacciones entre plantas vecinas influyen en la morfología de las plantas individuales, y la arquitectura final del cultivo. Parte de estas interacciones están mediadas por la capacidad de las plantas para detectar cambios en la cantidad, calidad y dirección de la luz, que a su vez desencadenan respuestas de desarrollo llamadas foto-morfogénesis. Los principales grupos de fotorreceptores implicados en la foto-morfogénesis son los fitocromos que absorben rojo (R) y rojo lejano (FR), los criptocromos que absorben azul/UV-A y las fototropinas. Como los tejidos fotosintéticos reflejan y absorben la luz de diferentes longitudes de onda diferencialmente, las plantas son capaces de detectar la presencia de los vecinos mediante la detección de cambios en la composición espectral de la luz y, en particular, por las reducciones en la proporción R:FR. Típicamente, una planta con tendencia a evitar el sombreado responde a los vecinos mediante el alargamiento de los entrenudos, el aumento de la relación tallos:hojas, reduciendo la activación de las yemas laterales, produciendo tallos más erectos y en algunos casos adelantando la floración. En algunas malas hierbas, la germinación puede ser activada por cambios en la proporción R/FR asociada con el laboreo. Las señales asociadas a la luz que interactúan con el oscilador circadiano central, permiten a las plantas detectar el fotoperiodo y ajustar el tiempo de la transición del estado vegetativo al desarrollo reproductivo (apartado 11.2.2).

La aparición sucesiva de hojas de las plantas es un componente importante del desarrollo morfológico. En general, el tiempo térmico entre la aparición de dos hojas consecutivas, conocido como filocrono, es constante. Por ejemplo, el trigo tiene una filocrono alrededor de 100ºC d con una temperatura base de 0ºC. En el girasol el filocrono es de alrededor de 20ºC d con una temperatura base de 4ºC.

11.4. CRECIMIENTO

En el Recuadro 11.3 se describen los métodos utilizados para cuantificar el crecimiento del cultivo. El crecimiento de los cultivos depende de la capacidad de la cu-

bierta para captar CO_2 y radiación (flecha verde en la Figura 11.3), de la capacidad del sistema radical para capturar agua y nutrientes del suelo (flecha negra en la Fig. 11.3), y de la eficiencia de las plantas para transformar los recursos (agua, nutrientes, radiación, dióxido de carbono) en biomasa (flecha roja). Las líneas discontinuas en la Figura 11.3 destacan cómo los factores ambientales, como la temperatura ambiente o la salinidad del suelo, modulan la tasa de captación de recursos y la eficiencia en la transformación de los recursos a biomasa vegetal. En otros capítulos nos ocuparemos en detalle de la captura y la eficiencia en el uso de la radiación (Capítulo 13), agua (Capítulo 14) y nutrientes (capítulos 24, 25 y 26).

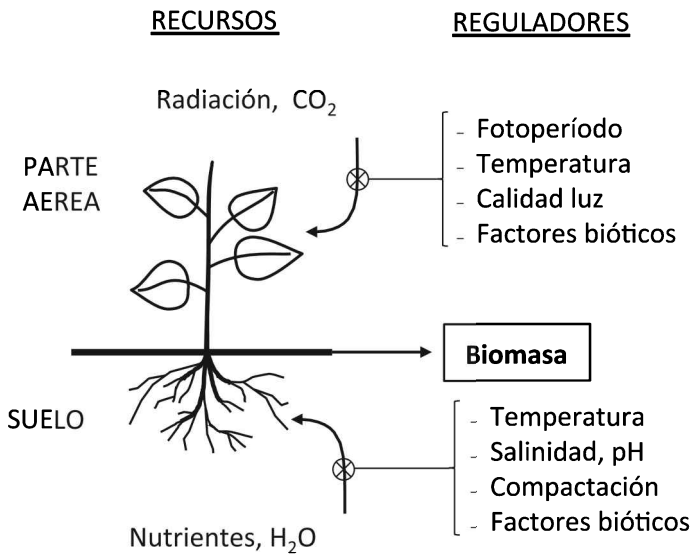


Figura 11.3. El crecimiento del cultivo depende de su capacidad para captar recursos del ambiente áereo y del suelo, y de su capacidad cultivos para transformar estos recursos en biomasa. Adaptado de Sadras VO, McDonald GK (2012) Water use efficiency of grain crops in Australia: principles, benchmarks and management. Grains Research and Development Corporation, Canberra.

La captura y la eficiencia en el uso de los recursos cambia con la etapa de desarrollo fenológico. El crecimiento de un cultivo típico anual se caracteriza por una curva sigmoide (Figura 11.4) con tres fases. En primer lugar, en una fase inicial, las plantas crecen lentamente, ya que dependen de las reservas en las semillas, mientras que los pequeños sistemas radicales y su baja área foliar limitan su capacidad para captar recursos. Muchas de las prácticas culturales (por ejemplo, la fecha de siembra, aplicación de fertilizantes) buscan reducir la duración de esta fase inicial, también conocida como "período perdido para el crecimiento". En segundo lugar, el crecimiento aumenta muy rápidamente hasta llegar a una fase lineal cuando el dosel y el sistema radical son suficientemente grandes para capturar una gran cantidad de recursos. Más tarde, el crecimiento del cultivo se ralentiza conforme el dosel y el sistema radical envejecen, entrando en una fase de senescencia en paralelo a

la acumulación de carbono y nitrógeno en los órganos reproductivos. La senescencia de las hojas y las raíces se regula genéticamente en un proceso conocido como senescencia monocárpica, aunque los estreses tales como la escasez de agua o de nutrientes pueden acelerar el proceso.

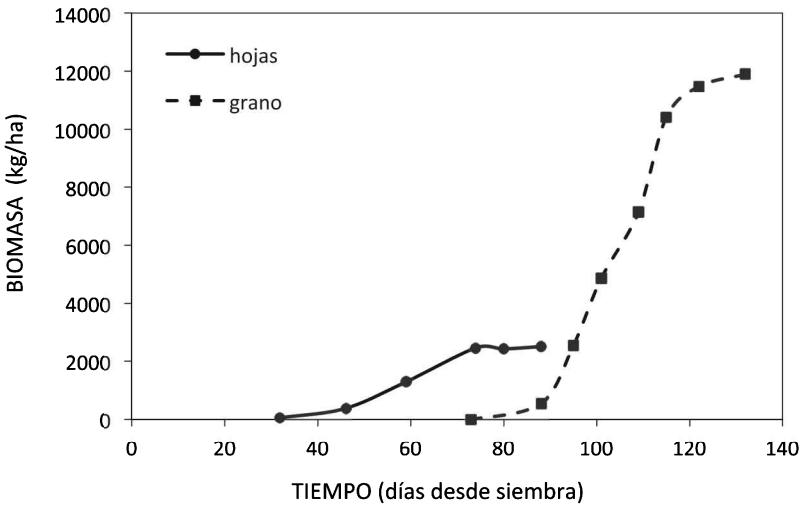


Figura 11.4. Evolución temporal de la biomasa de hojas y grano de un cultivo de maíz en Florida. Datos tomados de DSSAT 4.6, experimento UFGA8201MZ.

La Figura 11.5 ilustra la relación entre el crecimiento del cultivo y la captura de los recursos en los cultivos con condiciones favorables y estresantes. A medida que avanza el ciclo y las hojas y las raíces crecen, el cultivo aumenta la captura de recursos. Una línea recta representa el aumento del crecimiento con el aumento de la captación de recursos. El déficit de nutrientes o la compactación del suelo reducen el crecimiento a través de dos procesos: la reducción de la cantidad de recursos capturados por el cultivo (flecha horizontal en la figura 11.5.), y la reducción de la eficiencia en el uso de los recursos. La flecha vertical en la figura. 11.5 indica la reducción en el crecimiento para una misma cantidad de recursos capturada; esto significa una menor eficiencia.

En general la escasez de recursos (agua o nutrientes) y las limitaciones del suelo (compactación, salinidad) reducen el crecimiento de los cultivos mediante la reducción de la captura de recursos, en lugar de afectar a la eficiencia en el uso de los recursos.

La temperatura afecta al crecimiento directamente, al cambiar la velocidad de procesos tales como la división celular, la expansión de las hojas y la fotosíntesis del cultivo, e indirectamente al afectar el desarrollo fenológico y a la duración de las fenofases clave, como se ha discutido anteriormente. Dentro de los rangos agronómicamente sensibles, el principal efecto de la temperatura sobre la producción de los cultivos se relaciona con la modulación del desarrollo fenológico. En ambientes tem-

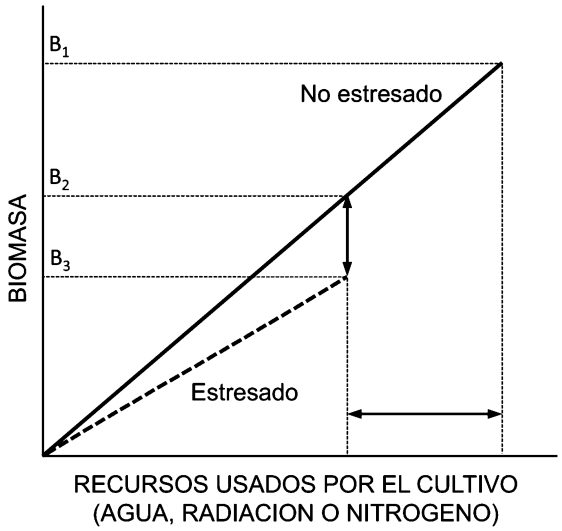


Figura 11.5. La biomasa del cultivo aumenta con el aumento de la captura de recursos, principalmente agua, radiación y nitrógeno. La biomasa máxima del cultivo se muestra como B_1. El estrés reduce el crecimiento del cultivo mediante la reducción de la captura de recursos (flecha horizontal) lo que resulta en B_2, la reducción de la producción por unidad de recurso (flecha vertical) o ambos, lo que conduce a B_3.

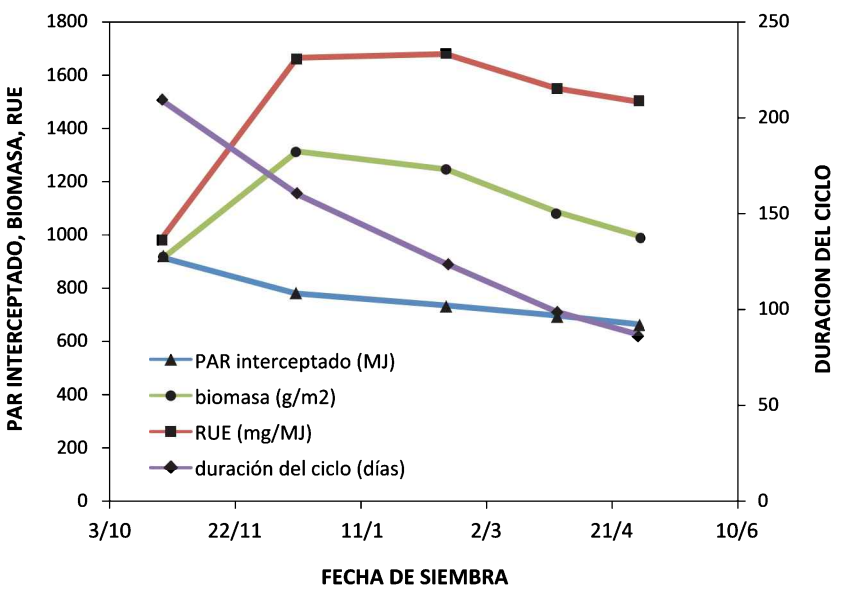


Figura 11.6. Efecto de la fecha de siembra sobre la duración del cultivo (tiempo desde siembra a maduración), PAR interceptado, eficiencia en el uso de la radiación (RUE) y producción de biomasa de Vicia faba. Adaptado de Confalone et al. 2010. Field Crops Res. 115:140-148

plados, la siembra tardía traslada el ciclo de cultivo a las condiciones más cálidas, el desarrollo procede más rápido, el periodo disponible para capturar los recursos y el crecimiento se reducen, y la biomasa en madurez es normalmente menor. La Figura 11.6 ilustra la interacción entre el desarrollo y el crecimiento de los cultivos de haba sembradas entre octubre (otoño) y principios de mayo (primavera) en Lugo, España. Conforme se retrasa la siembra, aumentan la temperatura y el fotoperiodo. Esto acorta las fenofases del cultivo, lo que resulta en una reducción del ciclo de cultivo de 209 a 87 días. Con una duración de ciclo más corto, el área foliar máxima se reduce, se reduce la cantidad de radiación interceptada por el cultivo y la producción final de la biomasa también se reduce. Por lo tanto, los efectos de la temperatura y del fotoperiodo sobre el desarrollo (duración del ciclo) tienen un papel dominante en el crecimiento estacional. Conviene destacar que en este ejemplo la primera fecha de siembra no se ajusta a este patrón. Para la primera siembra, el cultivo tiene la duración de ciclo más larga y la mayor interceptación de radiación como cabía esperar; por lo tanto, también debería dar lugar a la biomasa más elevada. Sin embargo, en esta siembra se produjo la menor cantidad de biomasa. La explicación es que la temperatura extremadamente baja en la primera siembra reduce la eficiencia fotosintética. En este caso, la respuesta fisiológica (fotosíntesis) fue más fuerte que la respuesta del desarrollo.

Recuadro 11.3. Cuantificación del crecimiento de los cultivos

Dependiendo del objetivo de las medidas, podríamos estar interesados en describir el crecimiento en términos de la altura del cultivo, el área foliar, el volumen de los frutos, o la masa de granos. Como el crecimiento del cultivo depende de la captura de los recursos, y éste a su vez está relacionado con los tamaños de la cubierta y del sistema radical, a menudo utilizamos el índice de área foliar (LAI, m^2 hoja/m^2 terreno) para medir el tamaño del dosel y la profundidad de las raíces y su densidad caracterizada como densidad de longitud de raíces (L_v, m raiz/m^3 suelo) para cuantificar el tamaño del sistema radical. El LAI es la relación entre área de hojas (suponiendo que hojas de una sola cara) y área de suelo y L_v es la longitud de raíces por unidad de volumen de suelo. Para muchas aplicaciones agronómicas, la biomasa de la parte aérea se mide tomando muestras de los cultivos (por ejemplo, cortando a ras de suelo 1 m^2 del cultivo), que se seca después hasta peso constante para expresar la biomasa como materia seca en g/m^2 o kg/ha; esta medida de materia seca se denomina normalmente biomasa. La toma periódica de muestras de biomasa en combinación con mediciones periódicas de interceptación de radiación, de absorción de nutrientes y de evapotranspiración permite el cálculo de la eficiencia en el uso de la radiación, de los nutrientes y del agua como se ilustra en la Fig. 11.5.

También se utilizan métodos indirectos para cuantificar la biomasa o la LAI. Para los árboles se establecen relaciones empíricas entre la biomasa y el diámetro del tronco, que han sido ampliamente utilizadas. La transmitancia del PAR o la reflectancia de la radiación en diferentes longitudes de onda (por ejemplo, rojo y rojo lejano) (véase el Capítulo 3) pueden ser relacionado con el LAI y son la base de los métodos indirectos para la medida no destructiva de LAI.

BIBLIOGRAFÍA

Connor DJ, Loomis RS, Cassman KG (2011) Crop ecology: productivity and management in agricultural systems, 2nded. Cambridge University Press, Cambridge UK.

Hay R, Porter J (2006) The physiology of crop yield, 2nd ed. Wiley-Blackwell

Sadras VO, Calderini DF (2014) Crop Physiology, 2nd ed, Academic Press, San Diego,CA

Apéndice 11.1. Duración de las fases del ciclo de crecimiento (método de la FAO) para diferentes especies agrícolas y zonas climáticas.

Especie	Clima	Fecha siembra	Duración de la fase				
Cultivos hortícolas			A	B	C	D	Total
Alcachofa (año 1)	M	Abril	40	40	250	30	360
Alcachofa (año 2)	M	Mayo	20	25	250	30	325
Espárrago	M-invierno cálido	Feb	50	30	100	50	230
Espárrago	M	Feb	90	30	200	45	365
Remolacha (mesa)	M	Abr/May	15	25	20	10	70
Brócoli	A	Sept	35	45	40	15	135
Coles Bruselas	M	Feb/Abril	20-25	30-35	20-25	10	80-95
Repollo	A,M	Sept	40	60	50	15	165
Repollo	M	Feb/Abril	20-25	30-35	20-25	10	80-95
Melón (Cantaloupe)	M- invierno cálido	Enero	30	45	35	10	120
Melón (Cantaloupe)	M	Ago	10	60	25	25	120
Zanahoria	A	Oct/Enero	20	30	40	20	110
Zanahoria	M	Feb/Mar	30	40	60	20	150
Zanahoria	A	Oct	30	50	90	30	200
Coliflor	A	Sept	35	50	40	15	140
Apio	SA	Oct/Enero	25-30	40-55	95-105	20	180-210
Apio	M	Abril	25	40	45	15	125
Pepino	A	May-Agosto	20	30	40	15	105
Pepino	A-invierno cálido	Nov/ Feb	25	35	50	20	130
Berengena	A	Octubre	30	40	40	20	130
Berengena	M	May/Junio	30	45	40	25	40
Lechuga	M	Abril	20	30	15	10	75

Lechuga	M	Nov/Ene	30	40	25	10	105
Lechuga	A	Oct/Nov	25	35	30	10	100
Lechuga	M	Feb	35	50	45	10	140
Melón	M	Marzo/May	25-30	30-35	40-50	20-30	120-140
Melón	A	Ago	15	40	65	15	135
Melón	A	Dic/Ene	30	45	65	20	160
Cebolla (rec. seca)	M	Abril	15	25	70	40	150
Cebolla (rec. seca)	A	Oct/ Ene	20	35	110	45	210
Cebolla (rec. fresca)	M	Abril/May	25	30	10	5	70
Cebolla (rec. fresca)	A	Octubre	20	45	20	10	95
Pimiento	T & M	Abril/Junio	30	35	40	20	125
Pimiento	A	Octubre	30	40	110	30	210
Calabaza	M	Mar, Ago	20	30	30	20	100
Calabaza	T	Junio	25	35	35	25	120
Rábanos	M, T	Mar/Abr	5	10	15	5	35
Rábanos	A	Invierno	10	10	15	5	40
Espinaca	M	Abr; Sep/Oct	20	20	20	5	65
Espinaca	A	Noviembre	20	30	40	10	100
Calabacín	M, A	Abr; Dic.	25	35	25	15	100
Calabacín	M,T	May/Junio	20	30	25	15	90
Tomate	A	Enero	25-30	40	40-70	30	135-155
Tomate	M	Abr/May	35	40	50	30	155
Tomate	A	Oct/Nov	35	45	70	30	180
Sandía	M	Abril	20	30	30	30	110
Sandía	A	May/Ago	10	20	20	30	80
Raíces,tubérculos & bulbos	**Clima**	**Fecha siembra**	**A**	**B**	**C**	**D**	**Total**
Mandioca (año 1)	T	Estación lluviosa	20	40	90	60	210
Mandioca (año 2)	T		150	40	110	60	360
Patata	SA	Ene/Nov	25	30	40	30	125
Patata	C	Abril/May	25-30	30-35	45-50	30	130-145

Patata	C	Abr/May	45	30	70	20	165
Patata	A	Dic	30	35	50	25	140
Boniato	M	Abril	20	30	60	40	150
Boniato	T	Estación lluviosa	15	30	50	30	125
Remolacha azucarera	M	Marzo/Abril	25-30	35-45	50-80	20-50	160-180
Remolacha azucarera	M	Oct/Nov	45	75	80	30	230
Remolacha azucarera	A	Sept/Nov	25-35	60-65	70-100	40-65	205-255
Remolacha azucarera	C	Abril	50	40	50	40	180
Leguminosas	**Clima**	**Fecha siembra**	**A**	**B**	**C**	**D**	**Total**
Judía (Phaseoulus) (verde)	M	Feb/Mar	20	30	30	10	90
Judía (Phaseoulus) (verde)	M, A	Ago/Sep	15	25	25	10	75
Judía (Phaseoulus) (seca)	C	May/Junio	20-25	25-30	30-40	20	100-110
Judía (Phaseoulus) (seca)	M	Junio	15	25	35	20	95
Haba (verde)	C, M	Mar/May	15-20	25-30	35	15	90-100
Haba (verde)	C,M	Oct	90	45	40	0	175
Haba (seca)	C,M	Nov	90	45	40	60	235
Caupí	M	Marzo	20	30	30	20	110
Cacahuete	T	Est. seca	25	35	45	25	130
Cacahuete	C, latitud alta	Primav.	35	35	35	35	140
Cacahuete	M	May/Junio	35	45	35	25	140
Lenteja	C	Abril	20	30	60	40	150
Lenteja	A	Oct/Nov	25	35	70	40	170
Guisante	C	May	15	25	35	15	90
Guisante	C,M	Nov, Mar-Abr	20-35	25-30	30-35	15-20	100-110
Soja	T	Dic	15	15	40	15	85
Soja	C, latitud alta	May	20	25-35	60-75	25-30	140-150

Cultivos para azúcar, aceite o fibra	Clima	Fecha siembra	A	B	C	D	Total
Ricino	SA	Marzo	25	40	65	50	180
Ricino	T	Nov.	20	40	50	25	135
Algodón	M,A	Mar-May (M), Sept. (A)	30	50	50-65	45-55	180-195
Algodón	A	Mar	45	90	45	45	225
Lino	C	Abril	25	35	50	40	150
Lino	A	Octubre	30	40	100	50	220
Lúpulo	C	Abril	25	40	80	10	155
Cártamo	M, A, SA	Marzo/Abril	20-25	35	45-55	25-40	125-145
Cártamo	A	Oct/Nov	35	55	60	40	190
Sésamo	C	Junio	20	30	40	20	100
Caña azúcar (virgen)	T, baja latitud	—	35	60	190	120	405
Caña azúcar (virgen)	T	—	50	70	220	140	480
Caña azúcar (virgen)	Pacífico	—	75	105	330	210	720
Caña azúcar (rebrote)	T, baja latitud	—	25	70	135	50	280
Caña azúcar (rebrote)	T	—	30	50	180	60	320
Caña azúcar (rebrote)	Pacífico	—	35	105	210	70	420
Girasol	M	Abril/May	25	35	45	25	130
Girasol	M invierno cálido	Feb	45	40	60	25	170
Cereales & pseudocereales	**Clima**	**Fecha siembra**	**A**	**B**	**C**	**D**	**Total**
Cebada, trigo, avena (cvs. primavera)	India (centro)	Noviembre	15	25	50	30	120
Cebada, trigo, avena (cvs. primavera)	Latitud media	Marzo/Abr	20-40	25-30	40-60	20-30	130-135
Cebada, trigo, avena (cvs. primavera)	Africa oriental	July	15	30	65	40	150
Cebada, trigo, avena (cvs. primavera)	C	Nov	40	60	60	40	200
Cebada, trigo, avena (cvs. primavera)	M	Dic	20	50	60	30	160

Trigo (invierno)	M-invierno cálido	Diciembre	20	60	70	30	180
Trigo (invierno)	M	Noviembre	30	140	40	30	240
Trigo (invierno)	C	Octubre	160	75	75	25	335
Otros cereales	M	Marzo-Abril	20	30	60	40	150
Otros cereales	A	Oct/Nov	25	35	65	40	165
Maíz (grano)	A	Dic/Ene	25	40	45	30	140
Maíz (grano)	T	Junio	20	35	40	30	125
Maíz (grano)	C (seco, frío)	Octubre	20	35	40	30	125
Maíz (grano)	M,C	Marzo-Abril	30	40	50	30-50	150-170
Maíz (dulce)	T	Marzo	20	20	30	10	80
Maíz (dulce)	M	May/Junio	20	25	25	10	80
Maíz (dulce)	A	Oct/Dic	20	30	40	10	100
Maíz (dulce)	C	Abril	30	30	30	103	110
Maíz (dulce)	M-invierno cálido	Ene	20	40	70	10	140
Mijo	A	Junio	15	25	40	25	105
Mijo	C	Abril	20	30	55	35	140
Sorgo (grano)	C,M	May/Junio	20	35	40	30	130
Sorgo (grano)	A	Mar/Abril	20	35	45	30	140
Arroz	T,M	Dic; May	30	30	60	30	150
Arroz	T	May	30	30	80	40	180
Forrajes	**Clima**	**Fecha siembra**	**A**	**B**	**C**	**D**	**Total**
Alfalfa *	Per. libre heladas		10	30	-	-	variable
Alfalfa *	M	Mar	5	10	10	5	30
Alfalfa *	C	Jun	5	20	10	10	45
Grama (semilla)	A	Marzo	10	25	35	35	105
Grama (heno)	A	---	10	15	75	35	135
Pasto de gramíneas	Per. libre heladas		10	20	-	-	variable
Pasto del Sudán (primer corte)	A	Abr	25	25	15	10	75
Pasto del Sudán (otros cortes)	A	Junio	3	15	12	7	37

Frutales, viñas y arbustos	Clima	Fecha siembra	A	B	C	D	Total
Platanera (año 1)	M	Mar	120	90	120	60	390
Platanera (año 2)	M	Feb	120	60	180	5	365
Cítricos	M	Ene	60	90	120	95	365
Frutal hoja caduca	C latitud alta	Marzo	20	70	90	30	210
Frutal hoja caduca	M,C latitud media	Marzo	20-30	50-70	120-130	30	240-270
Viñedo	Latitud baja	Abril	20	40	120	60	240
Viñedo	M, C latitud media	Mar/Abril	20-30	50-60	40-75	60-80	205-210
Viñedo	Latitud alta	May	20	50	90	20	180
Olivo	M	Marzo	30	90	60	95	365
Piña	T		60	120	600	10	790
Pistacho	M	Feb	20	60	30	40	150
Nogal	C latitud alta	Abril	20	10	130	30	190

Adaptado de Doorenbos y Pruitt (1977) y Allen et al. (1998). Esta tabla debe utilizarse con precaución, ya que la duración real de las fases puede cambiar para diferentes regiones, cultivares y las condiciones climáticas de cada año.

* Durante los primeros períodos de uso de ciclo de corte doble de los valores mostrados.
Climas: M (Mediterráneo), A (árido), SA (semiárido), C (continental), T (tropical)

Capítulo 12

La densidad de plantas y la competencia

F.J. VILLALOBOS
V.O. SADRAS
E. FERERES

RESUMEN:

Los cultivos responden a la densidad de plantación modificando las características de las plantas individuales, mediante cambios en el número y el tamaño de sus órganos. La respuesta a la densidad puede ser descrita matemáticamente por la "ley del rendimiento recíproco". En situaciones de muy alta densidad se produce mortalidad que, con frecuencia, es más pronunciada cuando las condiciones ambientales son más adecuadas (p.ej. alta fertilidad). Las curvas de rendimiento frente a densidad de plantas pueden ser asintóticas o parabólicas, aunque estas últimas pueden reflejar la existencia de un factor limitante adicional (p.ej. agua o nutrientes). En general, la variabilidad espacial de la densidad de siembra conduce a pérdidas de rendimiento que son más altas cuando la respuesta del rendimiento a la densidad es una curva parabólica.

12.1. INTRODUCCIÓN

La dinámica de poblaciones estudia la variación temporal en el número de individuos y sus atributos. Estos aspectos son importantes para entender la productividad de los cultivos, especialmente para evaluar el efecto de la densidad de siembra sobre el rendimiento. La dinámica de la población también nos ayuda a comprender la competencia de las malas hierbas con los cultivos y el proceso de mortalidad de las plantas, lo que puede ser crítico para el establecimiento de cultivos anuales o el mantenimiento de pastizales.

12.2. DENSIDAD Y COMPETENCIA

Un cultivo es una población de plantas con individuos del mismo genotipo y de la misma edad. La disponibilidad de recursos cambia en el tiempo y en el espacio y puede limitar el crecimiento del cultivo y causar competencia entre plantas vecinas. A diferencia de los animales, las plantas superiores muestran una gran plasticidad en su crecimiento y en su forma, en respuesta al estrés impuesto por la competencia. Por lo tanto, la estructura de las plantas individuales está configurada para responder al estrés de competencia mediante la variación de la velocidad de formación, del crecimiento o de la mortalidad de sus órganos (hojas, ramas, tallos, frutos, raíces, etc.). La respuesta puede implicar cambios en el tamaño de los individuos, en su forma o en el número de individuos.

La tasa de crecimiento de una población de plantas es proporcional a la densidad en las primeras etapas de desarrollo. Esta proporcionalidad se reduce más tarde conforme aumenta la competencia por los recursos entre las plantas, y por lo general conduce a una fase en la que la tasa de crecimiento de los cultivos es independiente de la densidad. Cuanto mayor sea la densidad inicial, antes comienza la competencia por los recursos. Las variaciones en la densidad inicial, por lo tanto se compensan en gran medida por las variaciones en las tasas de crecimiento de las plantas individuales. Esto ha sido verificado para muchas especies y ha sido llamada "ley del rendimiento final constante". Esto es cierto por encima de una población mínima de plantas de forma que haya suficiente oportunidad para explotar todos los recursos. En otras palabras, en sus primeras etapas de crecimiento a partir de semillas, la biomasa de un cultivo depende del número de plantas presentes, pero con el tiempo, el suministro de recursos comienza a controlar la velocidad de crecimiento de los individuos, hasta que finalmente es el factor limitante de la productividad, independientemente de la densidad. La población se comporta como un sistema integrado en el que el comportamiento de la planta individual está subordinado al comportamiento de la población.

Cualquier factor que reduce la tasa de crecimiento de las plantas resulta en un retraso del inicio de la competencia y una reducción de su intensidad. La relación entre el rendimiento por planta y la densidad a menudo se expresa por la siguiente ecuación (llamada "ley del rendimiento recíproco"):

$$W = \frac{1}{b_1 + b_2 D_p} \tag{12.1}$$

donde W es la masa seca por planta (g), D_p es la densidad de plantas (plantas m^{-2}) y b_1 y b_2 son coeficientes empíricos. La biomasa del cultivo (B, g m^{-2}) es el producto de la masa por planta y la densidad de plantas, y el rendimiento (Y) es el producto de la biomasa y el Índice de Cosecha (Capítulo 13) de modo que:

$$Y = \frac{HI \cdot D_p}{b_1 + b_2 D_p} \tag{12.2}$$

El coeficiente b_2 representa el inverso de la biomasa del cultivo (B) cuando la densidad es muy alta. Si D_p tiende a infinito en la ecuación 12.2, $B \approx b_2^{-1}$.

El coeficiente b_1 representa el inverso de W cuando no hay competencia, es decir, para muy baja densidad. Si D_p es cero en la ecuación 12.1, $W \approx b_1^{-1}$.

Ejemplo 12.1.

El rendimiento máximo de girasol para plantas aisladas de un cultivar particular es de 500 g, y el rendimiento máximo es de 500 g m^{-2} cuando la densidad es muy alta. ¿Cuál es el rendimiento esperado si la densidad de siembra es de 5 plantas m^{-2}?

$B \gg 1/b_2$ D_p cuando D_p es muy alta ----> $b_2 = 1/B = 1/500 = 0{,}002$ m^2/g

$1/W \gg b_1$ cuando D_p es muy pequeña -> $b_1 = 1/W = 1/500 = 0.002$ plantas/g

12.3. LA VARIABILIDAD ENTRE PLANTAS Y LA JERARQUÍA

La distribución de frecuencias del peso por planta en una población bajo estrés de densidad es sesgada, es decir, asimétrica. El sesgo aumenta con el tiempo y con la densidad de plantas, como se ilustra en la Fig. 12.1 para el girasol. En una población en competencia encontramos por tanto un gran número de individuos pequeños (de menos biomasa por planta) y un menor número de individuos de gran tamaño. El lugar de un individuo en la jerarquía de la población se determina principalmente en las primeras etapas de desarrollo. Se ha demostrado experimentalmente que la cantidad de biomasa producida por un individuo en una población en condiciones de competencia está muy estrechamente relacionada con el orden relativo de su aparición (emergencia) en la población. La ventaja de una aparición temprana debe estar relacionada con un aumento en el uso de recursos y la correspondiente privación de recursos para los individuos que aparecen más tarde. Esto implica que una fuente probable de variabilidad de masa de las plantas en el campo es la variabilidad en el tiempo de la emergencia que, a su vez, depende de la variación de las propiedades del suelo (contenido de agua, propiedades térmicas, compactación) y el método de la siembra.

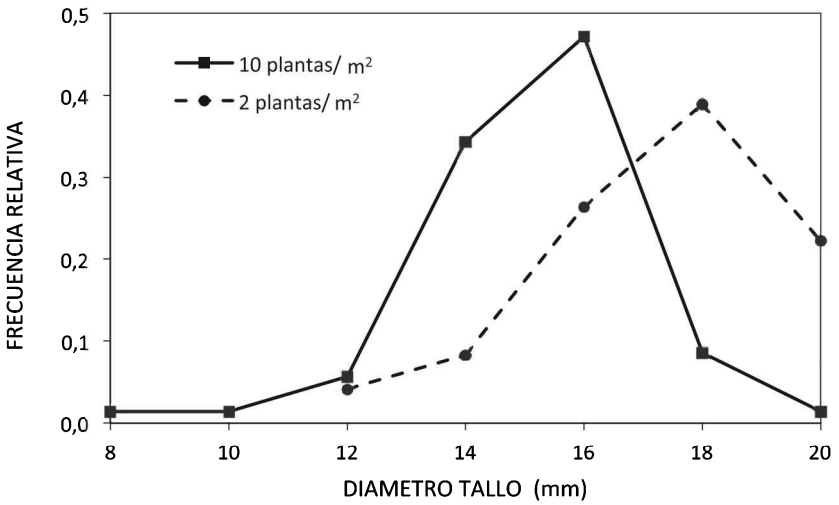


Figura 12.1. Distribuciones de frecuencia del diámetro del tallo de plantas de girasol para densidades de siembra de 10 o 2 plantas m^{-2}. Córdoba (España), 1994.

Además de la heterogeneidad de la emergencia de las plántulas, los herbívoros, las enfermedades y otros agentes dañinos (p.ej. granizo) son fuentes de heterogeneidad del cultivo de importancia agronómica. Por ejemplo, los insectos que se alimentan de los meristemos terminales de algodón ralentizan el crecimiento de la planta, ya que se requiere tiempo para la activación de las yemas axilares que vuelven a iniciar el crecimiento. Esta interrupción en el crecimiento de la planta dañada puede favorecer el crecimiento de plantas vecinas no dañadas. El rendimiento de un cultivo dañado de forma heterogénea puede ser el mismo (compensación), mayor (sobrecompensación) o más pequeño que el del cultivo en buen estado; el resultado depende de la ganancia en el crecimiento de las plantas sin daños con respecto a la reducción del rendimiento en las dañadas. Por ejemplo, los investigadores en el Reino Unido observaron cómo las plantas de patata sanas próximas a las plantas enfermas crecieron mucho más que las de cultivos uniformemente sanos.

Los insectos, las enfermedades u otros agentes que matan plántulas generan "huecos" en el cultivo. En ausencia de capacidad compensatoria (cuando se produce la pérdida de plantas muy tarde o cuando se originan huecos muy grandes) el rendimiento se reducirá en proporción a la reducción de la población de plantas. La relación entre el rendimiento y la pérdida de plantas, sin embargo, demuestra un mecanismo de compensación que se relaciona con la "relajación" de la competencia y depende de la distribución espacial de la pérdida de plantas y el momento en que se ésta produce (Fig. 12.2). En conclusión, la heterogeneidad de los cultivos a menudo, pero no siempre, reduce el rendimiento; el impacto de la heterogeneidad depende del tamaño de los huecos, de su distribución espacial, de la capacidad de las plantas para el crecimiento compensatorio (p.ej. trigo/ahijado>girasol/tallo único), la disponibilidad de los recursos y el tiempo disponible para el crecimiento compensatorio.

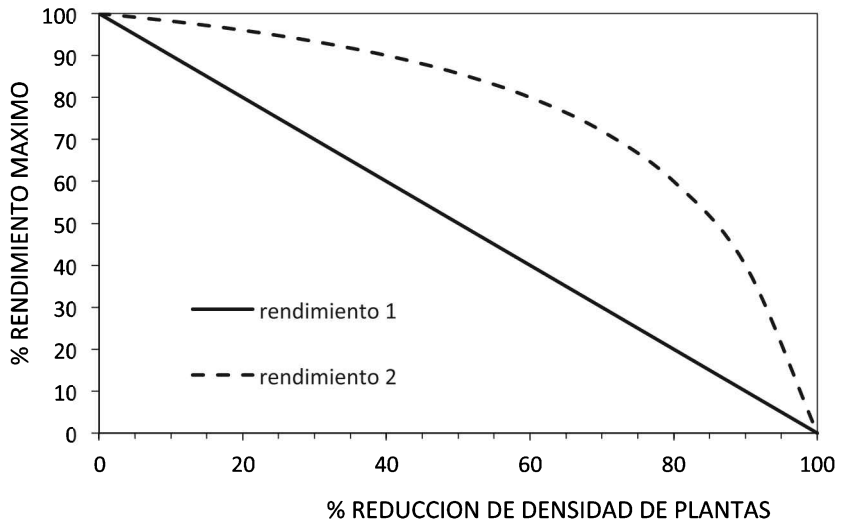


Figura 12.2. Efectos de la pérdida de plantas sobre el rendimiento. La línea continua corresponde a pérdidas que ocurren muy tarde o que se producen en grandes rodales por lo que no es posible el crecimiento compensatorio. La línea discontinua representa pérdidas muy tempranas con una distribución espacial aleatoria por lo que el crecimiento compensatorio es máximo.

12.4. DENSIDAD Y MORTALIDAD

La alta densidad tiende a aumentar el riesgo de muerte de los individuos de la población, aunque hay algunos ejemplos del efecto opuesto. El riesgo de mortalidad que aumenta con la densidad tiene propiedades reguladoras, actuando como una retroalimentación negativa sobre el tamaño de la población. Diversos estudios sobre "auto-eliminación" (mortalidad inducida por estrés de densidad) han demostrado que se produce a alta, pero no a baja densidad, comienza antes con mayor densidad y depende de las condiciones ambientales.

En los años 1920-1930 Suskatschew estudió la dinámica de autoeliminación en poblaciones de abeto cerca de San Petersburgo (Rusia), encontrando que la densidad final de plantas fue mayor en suelos pobres y poco profundos. En suelos más profundos se encontró con densidades más bajas de árboles más grandes. Este autor posteriormente encontró similares resultados en un experimento con *Matricaria inodora*, una especie anual, utilizando dos niveles de fertilidad y dos densidades. Se confirmó que la mortalidad fue mayor con la densidad más alta, y que el riesgo de muerte aumentó con una mayor fertilidad. La fertilización aparentemente aumentó la tasa de crecimiento de los individuos lo que aumenta el estrés de densidad y por lo tanto la tasa de mortalidad.

12.5. MECANISMOS DE COMPETENCIA ENTRE LAS PLANTAS

La densidad de las plantas en un cultivo determina la aparición de numerosos procesos de interferencia entre plantas individuales. A medida que se varía la densidad de plantas, el entorno de cada planta se altera en términos de intensidad y calidad de la luz y disponibilidad de recursos del suelo (agua, nutrientes).

Así, conforme aumenta la densidad de plantas, la radiación interceptada y la disponibilidad de agua y los nutrientes se reducen para cada individuo, lo que limita su capacidad de crecer. La calidad de la luz se cambia fundamentalmente en la relación entre el rojo (670 nm) y el rojo lejano (760 nm) (relación R:FR). En promedio, la luz del sol tiene una relación R:FR de 1.15. Como la radiación roja es absorbida por los pigmentos vegetales, la luz transmitida o reflejada por la vegetación tiene una menor relación R:FR. Así por ejemplo, R:FR debajo de un cultivo puede variar entre 0.1 y 0.5. A medida que la densidad aumenta la relación R:FR se reduce, y esta reducción se detecta por los fitocromos, lo que induce cambios morfológicos en muchas especies (aumento de crecimiento en altura, reducción en la ramificación lateral o el ahijado).

Las principales respuestas de los cultivos a una mayor densidad son:

- Reducción del crecimiento expansivo y de masa (por planta). El área foliar de la planta y por lo tanto la radiación interceptada por planta se reducen.
- Incremento o disminución en el índice de cosecha (HI) en algunas especies: para muy baja densidad, la biomasa por planta pueden ser muy grande mientras que el crecimiento de semillas está limitado por el número de semillas y por la tasa potencial de crecimiento de la semilla, lo que implica una caída de HI. En otros casos (p.ej. maíz) las densidades muy altas aumentan el porcentaje de plantas estériles.
- Reducción del número de semillas por planta y/o la masa de semillas individuales.
- Cambios en la distribución de materia seca entre los órganos de la planta: aumento de la partición a tallo y reducción del reparto a hojas (Figura 12.3). En general aumenta la altura y se reduce el diámetro del tallo, es decir, aumenta notablemente su esbeltez y por lo tanto, el riesgo de encamado en situaciones adversas (p.ej. vientos fuertes).
- Reducción de la ramificación en dicotiledóneas (p.ej. soja) y del ahijado en los cereales.
- Aceleración de la senescencia foliar: en condiciones de alta densidad la senescencia foliar se inicia más temprano y la tasa de senescencia es mayor, lo que parece ocurrir en respuesta a los niveles muy bajos de radiación.
- Cambios en la calidad del producto cosechado: en algunos casos la alta densidad puede mejorar la calidad (p.ej. porcentaje de aceite en la semilla de girasol) y en otros casos la puede empeorar (p.ej. tamaño de la semilla de girasol para consumo directo). En general, el tamaño de los órganos cosechables se reduce a medida que aumenta la densidad (granos, tubérculos, bulbos, etc.).

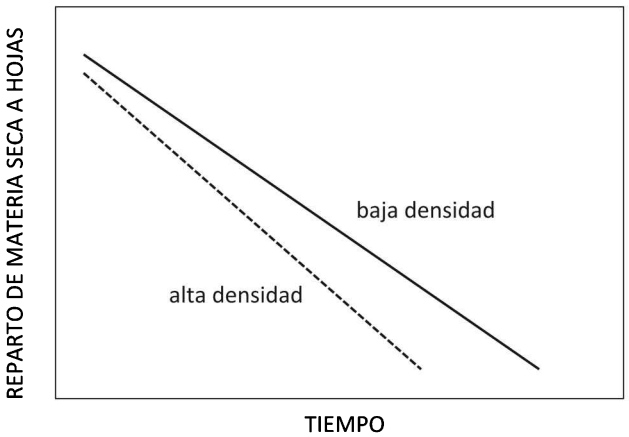


Figura 12.3. Variación temporal del coeficiente de partición de materia seca a hojas en girasol para densidades bajas y altas.

12.6. EL RENDIMIENTO Y LA DENSIDAD DE PLANTAS

A lo largo del siglo XX se prestó gran atención a las relaciones entre la densidad de siembra y el rendimiento de los cultivos. Estas relaciones son importantes desde el punto de vista práctico para determinar la densidad óptima.

Se encuentran dos tipos de relaciones entre el rendimiento y la densidad: asintótica y parabólica (Figura 12.4). En el primer tipo, el rendimiento aumenta con la densidad, alcanza una meseta y no disminuye para densidades muy altas. Este caso también se encuentra cuando se representa la producción de biomasa frente a la densidad. En el caso parabólico, el rendimiento alcanza un máximo a una densidad intermedia y disminuye para densidades mayores o menores.

La producción de biomasa de cualquier cultivo sigue una relación asintótica con la densidad. Esta es la respuesta que se puede esperar según la Ley del rendimiento recíproco (Ec. 12.2). En cultivos cosechados por sus semillas es normal observar una disminución del rendimiento para altas densidades (respuesta parabólica), que implica que el índice de cosecha se reduce. Esto se puede deber a un efecto directo de la densidad (p.ej. la esterilidad en el maíz) o como resultado de otra limitación de recursos como el agua o los nutrientes. Por ejemplo, en situaciones de déficit hídrico las densidades más altas corren un mayor riesgo de no tener suficiente agua durante el llenado del grano. La evidencia de que una curva parabólica es el producto de una limitación distinta a la densidad puede provenir de la observación de que la densidad para el máximo rendimiento aumenta con el aumento de la disponibilidad de agua o de nutrientes (Fig. 12.5). Además, dentro de una especie podemos encontrar distintas curvas rendimiento-densidad para los diferentes cultivares, especialmente si difieren en la duración del ciclo. Los ciclos muy cortos producen menos biomasa y cosecha a bajas densidades. El rendimiento máximo se alcanza a una mayor densidad si el ciclo es corto que si es largo. Un

ciclo largo puede explotar al máximo los recursos disponibles con densidades bajas. Es decir, se compensa la baja densidad con un período vegetativo más largo que implica un mayor potencial de crecimiento para las plantas individuales. Esto se ilustra en la Figura 12.6 para el caso de dos cultivares de girasol en Córdoba, España. En los cereales de invierno, los mejoradores han incorporado una plasticidad sustancial en la respuesta a la densidad, y los rendimientos son los mismos para un amplio rango de densidades siempre y cuando los recursos no sean limitantes (condiciones de buen suministro de agua y nutrientes). Incluso en el maíz, las variedades más modernas son bastante resistentes a la esterilidad inducida por alta densidad y los rendimientos no disminuyen hasta que se alcanzan densidades muy elevadas (> 150000 plantas/ha).

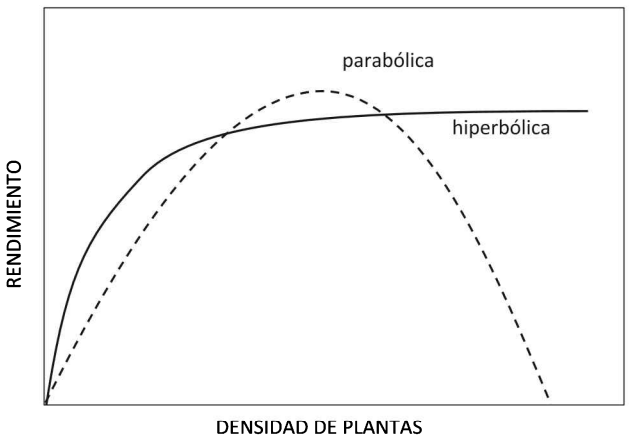


Figura 12.4. Curvas genéricas de respuesta (asintótica o parabólica) del rendimiento frente a la densidad.

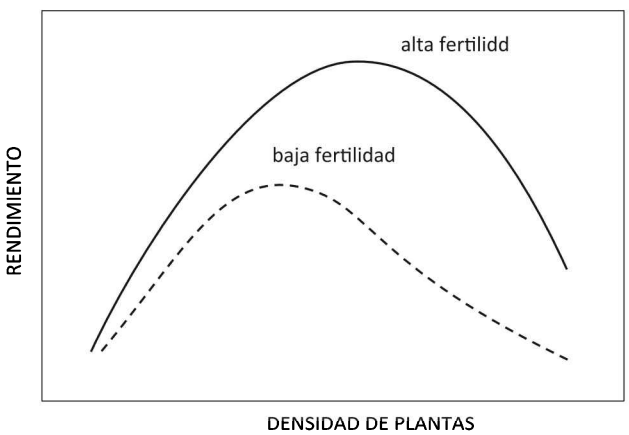


Figura 12.5. Variación en las curvas de respuesta parabólica del rendimiento frente a la densidad cuando se cambia la disponibilidad de recursos.

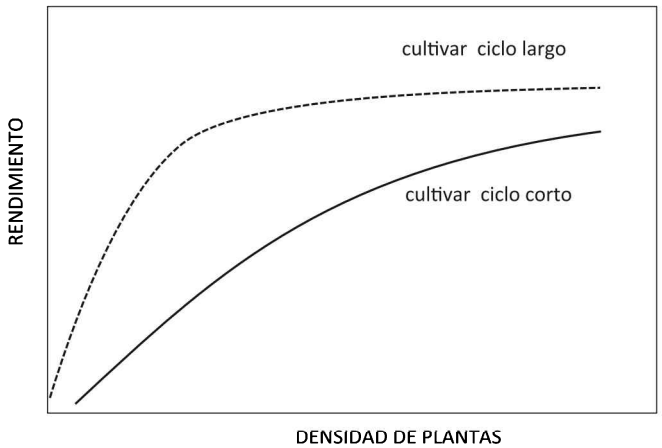


Figura 12.6. Respuesta del rendimiento de girasol a la densidad para genotipos de ciclo corto o largo.

Empleando la Ley del rendimiento recíproco (ecuación 12.1) se puede deducir para qué densidad se alcanza una fracción de la biomasa máxima (r = B/Bmax):

$$D_p(r) = \frac{r\, b_1}{(1-r)b_2} \tag{12.4}$$

Las relaciones entre rendimiento y densidad obtenidos experimentalmente deben ser utilizadas con precaución ya que dependen de las limitaciones de agua y nutrientes y el cultivar considerado. En cualquier caso hay que señalar que habrá una densidad mínima que se debe incrementar para cultivares de ciclo corto. Por otra parte, si el agua o los nutrientes son limitantes, hay que evitar las altas densidades que podrían reducir la fracción cosechable de la biomasa y, por lo tanto el rendimiento. La alta densidad puede provocar otros efectos indeseables, tales como un mayor riesgo de encamado que puede disminuir el rendimiento de forma espectacular.

Las respuestas parabólicas a la densidad también se observan en algunos cultivos hortícolas, donde el precio del producto está estrechamente relacionado con el tamaño del órgano cosechable (p.ej. ajo, cebolla, zanahoria). Las altas densidades conducen a precios de venta más pequeños y por lo tanto a una relación entre ingresos/ha y densidad de tipo parabólico.

Las relaciones rendimiento-densidad mencionadas anteriormente, se obtienen en parcelas experimentales en las que la densidad de cultivo es uniforme en toda la parcela. Sin embargo, en parcelas comerciales las plantas no se distribuyen de manera uniforme en todo el campo. Hay una variabilidad espacial de la densidad por lo que hay áreas donde la densidad es alta y áreas en las que es baja. Esto puede ser debido a la variabilidad de las condiciones del suelo (compactación, agua inicial), la presencia de plagas y enfermedades del suelo o a la mala distribución de la semilla durante la siembra.

Ejemplo 12.2.

Dos variedades de girasol difieren en ciclo. Para muy baja densidad la variedad más corta produce 360 g/planta y la más larga 1400 g/planta. En este ambiente la producción máxima de biomasa es de 1200 y 1600 g/m^2 para el ciclo corto y el largo, respectivamente. Vamos a calcular las densidades requeridas para alcanzar el 90% de la máxima biomasa con estas variedades.

Para las dos variedades:

Corta: $b_2 = 1/1200 = 8.33\ 10^{-4}$ m^2/g

Larga: $b_2 = 1/1600 = 6.25\ 10^{-4}$ m^2/g

Cultivar de ciclo corto:

$$1/W \approx b_1 \text{ cuando } D_p \text{ es muy pequeño } \text{--> } b_1 = 1/W = 1/360 = 2.78\ 10^{-3} \text{ plantas/g}$$

$$D_p(r) = \frac{r\, b_1}{(1-r)b_2} = \frac{0.9\ x\ 2.78\ 10^{-3}}{(1-0.9)\ 8.33\ 10^{-4}} = 30\ plantas\ m^{-2}$$

Cultivar de ciclo largo:

$$1/W \approx b_1 \text{ cuando } D_p \text{ es muy pequeño } \text{--> } b_1 = 1/W = 1/1400 = 7.14\ 10^{-4} \text{ plantas/g}$$

$$D_p(r) = \frac{r\, b_1}{(1-r)b_2} = \frac{0.9\ x\ 7.1410^{-4}}{(1-0.9)6.2510^{-4}} = 10\ plantas\ m^{-2}$$

Vemos que para lograr rendimientos cercanos al máximo se requiere una densidad mucho mayor para el cultivar de ciclo corto.

En general, podemos esperar que cuanto mayor sea la variabilidad en la densidad de las plantas mayor será la disminución en el rendimiento. Sin embargo, depende en gran medida del tamaño de los huecos y de la posibilidad de compensación, como se indica en 12.3. El efecto negativo de la variabilidad debe ser más pronunciado cuando la respuesta es parabólica ya que tanto las densidades más bajas y como las más altas reducen el rendimiento por debajo del máximo. En este caso, si no podemos evitar una variabilidad muy alta (problemas del suelo o de la maquinaria, por ejemplo), podemos reducir la densidad de siembra por debajo del óptimo teórico.

BIBLIOGRAFÍA

Connor DJ, Loomis RS, Cassman KG (2011) Crop ecology: productivity and management in agricultural systems (2nd ed) Cambridge University Press.

Harper J L (1977) Population biology of plants. Academic Press.

Capítulo 13

Interceptación de radiación, eficiencia en el uso de la radiación y productividad de los cultivos

V.O. SADRAS
F.J. VILLALOBOS
E. FERERES

RESUMEN:

La fotosíntesis es el conjunto de procesos por los cuales la energía radiante se convierte y se almacena como energía química en la mayoría de las plantas, algas y cianobacterias. Este proceso depende de la radiación, la temperatura y la concentración de CO_2. La máxima eficiencia del proceso es 6%, pero por lo general es mucho más baja. La fotosíntesis a nivel de hoja se puede describir matemáticamente, y este análisis se puede extender para el cálculo de la fotosíntesis de los cultivos, en función de su índice de área foliar, del coeficiente de extinción como una simplificación de la arquitectura del dosel, y de los parámetros fotosintéticos de la hoja.

La respiración del cultivo se puede descomponer en un componente de mantenimiento que depende de la biomasa y de la temperatura, y un componente de crecimiento que es proporcional a la fotosíntesis bruta.

El rendimiento del cultivo se puede expresar como el producto de tres factores, la cantidad de radiación interceptada, la eficiencia en el uso de la radiación (RUE) y el índice de cosecha (HI). La RUE es menor para cultivos C3 que para los C4, y es menor en los cultivos con semillas ricas en aceite y proteínas en comparación con los cereales. La intercepción de radiación depende de la radiación incidente, del índice de área foliar y del coeficiente de extinción. El HI depende de la especie y de su utilización. La principal causa de las mejoras de rendimiento debidas a la mejora genética en el pasado ha sido el aumento de HI, que ha sido un éxito notable en el caso de los cereales; el maíz es la principal expectativa de esta tendencia. En algunos casos, como el trigo de alto rendimiento en el norte de Europa, el HI está llegando a un límite biofísico, por lo que las mejoras adicionales en el rendimiento deberían basarse en aumentar la RUE y la biomasa.

13.1. INTRODUCCIÓN

La entrada de energía a los ecosistemas se basa en el proceso de fotosíntesis en la que la luz solar se convierte en energía química. La fotosíntesis es el proceso primario en la producción de compuestos de carbono necesarios para la construcción y mantenimiento de la biomasa del cultivo. Aquí, el foco es la fotosíntesis a nivel de hoja con un breve ejercicio de ampliación de la fotosíntesis a nivel de cultivos, que enlaza con características de los cultivos desarrolladas en el Capítulo 3. Cuando medimos la tasa de intercambio de CO_2 de una hoja, esta tasa es la fotosíntesis neta (P_n) que resulta de descontar a la fotosíntesis bruta (P_g) las pérdidas de respiración (R). Utilizamos aquí la convención de que los flujos hacia la hoja son positivos, mientras que los flujos desde la hoja hacia el aire son negativos. Vamos a analizar cómo la radiación, el CO_2 y la temperatura modulan la fotosíntesis. Otros factores que afectan a la fotosíntesis, como el estado hídrico de las plantas y la disponibilidad de nitrógeno se analizan en otros capítulos.

En la segunda parte de este capítulo se discute la relación entre la producción de biomasa y la cantidad de radiación absorbida por los tejidos fotosintéticamente activos, es decir, la eficiencia en el uso de la radiación (RUE) para la producción de biomasa. La radiación absorbida está estrechamente relacionada con la radiación interceptada, es decir, la diferencia entre la radiación incidente y la que llega a la superficie del suelo (Capítulo 3). La eficiencia en el uso de la radiación varía entre los tipos de cultivo en relación tanto con el metabolismo fotosintético (C4-C3) como con la composición de las semillas (cereales, leguminosas y oleaginosas); también hay variabilidad moderada entre cultivares que pueden ser explotadas en los programas de mejora. La edad de la planta, la relación fuente-sumidero, la materia seca y la distribución del nitrógeno también afectan a la eficiencia en el uso de la radiación de los cultivos. El nitrógeno, el agua y la temperatura son los principales factores ambientales con efectos tanto en la radiación interceptada como en la eficiencia en el uso de la radiación.

13.2. LA FOTOSÍNTESIS A NIVEL DE HOJA

La mayoría (85-90%) de la materia seca acumulada en un cultivo se deriva de la fotosíntesis, que se puede descomponer en los tres procesos siguientes:

a) Difusión de CO_2 desde la atmósfera a los cloroplastos, siguiendo el gradiente de concentración:

$$P_n = g_{sc} (C_a - C_i) \quad (13.1)$$

donde P_n (μmol m^{-2} s^{-1}) es el flujo neto de CO_2 que entra a la hoja, g_{sc} es la conductancia estomática para CO_2 (mol m^{-2} s^{-1}) y C_a y C_i son las concentraciones (μmol CO_2 mol^{-1}) en el aire que rodea a la hoja y en la cavidad subestomática, respectivamente.

b) Absorción de la luz por los pigmentos fotosintéticos y fotólisis del agua. La cantidad de radiación absorbida depende de la concentración de los pigmentos,

principalmente clorofilas, presentes en los cloroplastos. En esta etapa, se libera oxígeno y se generan compuestos energéticos (ATP y NADPH). Este proceso no depende de la temperatura ni de la concentración de CO_2.

c) Reducción de CO_2 usando los compuestos generados en la fotólisis del agua. Por cada molécula de CO_2 reducida se requieren entre 8 y 12 de cuantos de luz. La reducción se puede producir en la oscuridad y es muy sensible a la temperatura.

En resumen, la fotosíntesis de una hoja de una planta sana, con buen suministro de agua y nutrientes, depende de la radiación, de la concentración de CO_2 y de la temperatura.

La eficiencia energética de la fotosíntesis, es decir, la relación entre la energía almacenada en forma química y la radiación solar incidente, tiene un valor máximo alrededor del 6%, pero la eficiencia real en cultivos agrícolas por lo general no excede de 2-3%. Podemos calcular la importancia relativa de la fotosíntesis en la ecuación del balance de energía (Capítulo 7) de la siguiente manera. La radiación neta (R_n) sobre un cultivo es equivalente al 60-80% de la radiación solar (R_s) dependiendo principalmente de la nubosidad. En un día despejado se puede asumir $R_n = 0.6\ R_s$, de modo que la energía almacenada por fotosíntesis con un 6% de eficiencia representa el 10% de la radiación neta. Sin embargo, la energía gastada en la fotosíntesis también incluye una fracción que se pierde por la respiración. Si esa fracción es un tercio, se deduce que el 15% de la radiación neta puede ser gastada en la fotosíntesis. Por lo tanto, la suposición habitual de considerar despreciable el uso de energía en la fotosíntesis puede ser equivocada, en particular, cuando la productividad es alta (p.ej., cultivos de invernadero) y la radiación solar es baja.

13.3. TIPOS DE PLANTAS DE ACUERDO CON LOS MECANISMOS DE LA FOTOSÍNTESIS

Las plantas superiores han desarrollado tres sistemas fotosintéticos diferentes (C3, C4 y CAM) que tienen características anatómicas y químicas distintas. Las plantas terrestres evolucionaron a partir de algas y en un principio eran todas C3. Posteriormente se produjo una evolución para algunas especies hacia sistemas C4 y CAM. El tipo C3 es el mayoritario para las especies agrícolas y la flora natural. Pocas especies presentan el sistema C4, aunque incluyen importantes especies cultivadas (maíz, sorgo, mijo, caña de azúcar, y algunas gramíneas tropicales como *Paspalum),* mientras que el sistema CAM es menos frecuente y menos importante entre las especies cultivadas (ágave, piña). Las plantas C3 se encuentran en latitudes desde medias y altas y en zonas de gran altitud, mientras que las C4 son más propias de regiones tropicales y subtropicales. La fotosíntesis C4 es un rasgo evolutivo complejo que resultó de una importante reorganización de la anatomía de la hoja y del metabolismo que conduce a un mecanismo de concentración de CO_2 que contrarresta los efectos inhibitorios de la baja concentración de CO_2 atmosférico en la fotosíntesis. La vía C4 evolucionó de forma independiente al menos 45 veces en los últimos 35 millones de años. Las principales características de los tres sistemas son los siguientes:

a) Plantas C3. El primer compuesto formado en el proceso es el ácido fosfoglicérico (3 átomos de carbono) por combinación de ribulosa difosfato (5C) con CO_2. La enzima responsable es la ribulosa-bifosfato (Rubisco). Aunque principalmente sirve para la carboxilación, la Rubisco también puede actuar como oxigenasa. Por lo tanto, en presencia de la luz, O_2 compite con CO_2 por los sitios activos de la enzima lo que lleva a una pérdida de CO_2 (fotorrespiración). Además de su función enzimática, la gran cantidad de Rubisco en la planta significa que juega un papel importante como reserva de nitrógeno reducido. Esto es más evidente durante el llenado del grano y la senescencia de los cultivos anuales, en los que una parte significativa del nitrógeno, almacenado como Rubisco, se transporta y contribuye al contenido de proteína en el grano.

b) Plantas C4. El primer compuesto formado en el proceso es el ácido oxaloacético (4 carbonos) mediante la combinación de fosfoenol-piruvato (PEP) con CO_2. La enzima responsable es la fosfoenol-piruvato carboxilasa. Las plantas C4 alcanzan una mayor fotosíntesis por unidad de energía y por unidad de agua que sus homólogas C3, y esto contribuye a su adaptación a los ambientes secos.

c) Plantas CAM (Metabolismo Acido de la Crasuláceas). Este sistema es predominante en la familia *Crassulaceae* que incluye numerosos cactus. La fijación de CO_2 se produce durante la noche mediante la formación de PEP que se convierte en ácidos orgánicos que se almacenan en las vacuolas. Durante el día el malato entra en los cloroplastos, donde se regenera PEP. Las plantas CAM se comportan como C3 si el suministro de agua es adecuado. En situaciones de sequía las plantas CAM reducen su consumo de agua en comparación con las plantas C3 y C4.

13.4. EFECTOS DE LOS FACTORES AMBIENTALES SOBRE LA FOTOSÍNTESIS

Los principales factores ambientales que afectan a la tasa de fotosíntesis son la radiación solar, la temperatura y la concentración de CO_2. Las enfermedades, y los déficits de agua o nutrientes pueden limitar mucho la fotosíntesis, aspectos que se discuten en los Capítulos 14 y 15.

13.4.1. Radiación

La fotosíntesis neta de una hoja (P_n) responde a la irradiación solar (I) como se muestra en la figura 13.1. Para I = 0, la hoja pierde CO_2 a una velocidad R_d (respiración en la oscuridad). La asimilación es cero en el llamado punto de compensación de luz, en el que la fotosíntesis bruta es igual a la tasa de respiración. Con mayor I, P_n crece rápidamente hasta un máximo en el que el sistema alcanza la saturación de la luz. Para muchas especies, P_n está saturado muy por debajo de la radiación típica de días despejados, lo que es particularmente cierto para la mayoría de las plantas C3. El valor máximo de P_n varía en gran medida entre los grupos C3 y C4, y también

dentro de cada grupo. Sin embargo, la pendiente inicial de la relación $P_n = f(I)$ es relativamente constante para todas las especies.

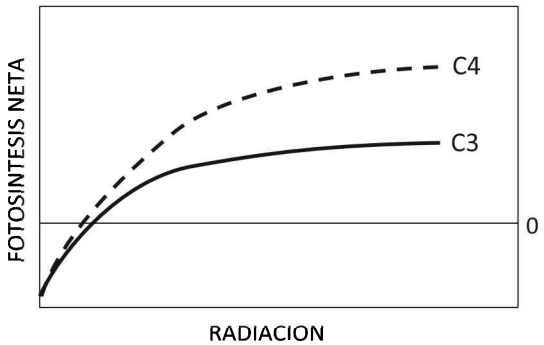


Figura 13.1. Relaciones genéricas entre fotosíntesis neta de hoja y radiación solar para plantas C3 y C4.

Si R_d es constante a medida que aumenta I, la fotosíntesis bruta se puede definir como $P_g = P_n + R_d$. La tasa de fotosíntesis bruta aumenta con la radiación siguiendo una hipérbola del tipo:

$$P_g = \frac{\varepsilon I P_{gx}}{\varepsilon I + P_{gx}} \qquad (13.2)$$

donde P_g es la tasa de fotosíntesis bruta (μmol m^{-2} s^{-1}), I es la radiación (W m^{-2}), ε es la pendiente inicial de la curva $P_g = f(I)$ y P_{gx} es el valor asintótico de P_g cuando I tiende a infinito. Las plantas C3 tienen valores de P_{gx} en el rango de 10-40 μmol m^{-2} s^{-1} mientras que las C4 muestran un rango de 18-55 μmol m^{-2} s^{-1}. La pendiente inicial de la curva es similar para las especies C3 y C4 con un valor de alrededor de 0.076 mol J^{-1}. Cuando la radiación se expresa como PAR absorbida, la pendiente inicial (ahora con unidades mol fotones m^{-2} s^{-1}) se denomina eficiencia cuántica de la fotosíntesis, que es una medida de la eficiencia intrínseca del sistema fotosintético. En el rango de 20-25ºC tanto las plantas C3 como las C4 tienen una eficiencia cuántica alrededor de 0.06 moles de CO_2/E. Para temperaturas más bajas las plantas C3 funcionan mejor y para temperaturas más altas ocurre lo contrario.

Las plantas C3 alcanzan su P_{gx} con radiación mucho menor que las plantas C4. En condiciones óptimas, las plantas C4 muestran mayor P_{gx} que las plantas C3, aunque las diferencias se atenúan cuando subimos de la escala de hoja a la de comunidad de plantas. Por lo tanto, la biomasa máxima producida por los cultivos C3 y C4 se diferencian mucho menos que las tasas máximas de fotosíntesis a nivel de hoja.

El nivel de radiación al que han crecido las hojas también afecta a su respuesta a la radiación. Cuando una hoja ha crecido a la sombra, P_{gx} es menor que cuando ha crecido bajo alta radiación. Este proceso de aclimatación se debe a una mayor acumulación de proteínas (enzimas fotosintéticas) en las hojas bajo alta radiación.

13.4.2. Temperatura

La fotosíntesis máxima responde a la temperatura siguiendo una curva en forma de campana, con un máximo entre 15 y 25ºC para plantas C3 y entre 25 y 35ºC para las C4 (Fig. 13.2). Muy pocas especies C4 funcionan bien en condiciones de baja temperatura, mientras que la mayoría de estas especies sufren daños irreversibles con temperaturas entre 10 y 12ºC (daño por frío). Muchas plantas C3 como el algodón y el girasol funcionan bien con alta temperatura (30-40ºC) aunque algunas C3 son sensibles a las bajas temperaturas (p.ej., platanera). Sin embargo las hojas de plantas C3 en general toleran bien temperaturas hasta 0ºC.

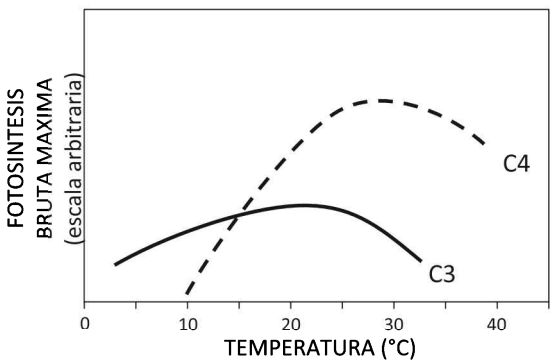


Figura 13.2. Respuesta de la fotosíntesis bruta máxima a la temperatura para cultivos C3 y C4.

13.4.3. La concentración de CO_2 y los factores endógenos

La fotosíntesis aumenta a medida que aumenta la concentración de CO_2 gracias al mayor gradiente de concentración entre la atmósfera y el mesófilo de la hoja (ec. 13.1). La fotosíntesis neta responde linealmente a la concentración de CO_2 para las plantas C3. Las hojas de las especies C3 pierden CO_2 (P_n es negativo) para concentraciones de CO_2 por debajo de 50-100 ppm. La concentración de CO_2 para el que $P_n = 0$ se llama punto de compensación de CO_2. Las plantas C4 muestran poca respuesta a la concentración de CO_2 en el rango de 200-400 ppm.

Además de los efectos ambientales, la tasa de fotosíntesis puede verse afectada por la existencia de sumideros capaces de acumular los hidratos de carbono generados. Por ejemplo, la supresión de los tubérculos de plantas de patata conduce a una disminución en la tasa de fotosíntesis.

13.5. LA RESPIRACIÓN

La respiración (oxidación de hidratos de carbono y otros compuestos para producir energía) en plantas se puede dividir en dos componentes principales: respiración de

crecimiento (R_g) que es proporcional a la fotosíntesis bruta y la respiración de mantenimiento (R_m) que es proporcional a la biomasa del cultivo (B):

$$R_d = R_g + R_m = a\ P_g + b\ B \tag{13.3}$$

La respiración de crecimiento es el coste de la energía implicada en la síntesis de la biomasa de las plantas a partir de glucosa, que es considerado el pilar fundamental de los tejidos vegetales. Por ejemplo, 1 g de glucosa permite la construcción de aproximadamente 0.65 g de hojas (o tejidos vegetativos en general). El coste de la energía depende principalmente de la composición del tejido: la síntesis de grasas y proteínas implican una mayor R_g que la de hidratos de carbono (véase 13.10).

La respiración de mantenimiento es el coste de la energía asociada con el mantenimiento de la organización y el funcionamiento de los tejidos de los cultivos. Los procesos fundamentales en los que se invierte R_m son el recambio de proteínas y el mantenimiento de los mecanismos activos de transporte iónico. Por esta razón, las plantas deficientes en N o las plantas más viejas con baja concentración de nitrógeno tienen una menor respiración de mantenimiento por unidad de materia seca como se ilustra en la Fig. 13.3. La respiración de mantenimiento por unidad de biomasa crece de forma exponencial con la temperatura hasta 40-50ºC, dependiendo de la especie. Para temperaturas más altas se produce un daño irreversible. Los valores típicos de R_m a 20ºC se encuentran entre 0.01 y 0.035 g de glucosa/g de materia seca/día.

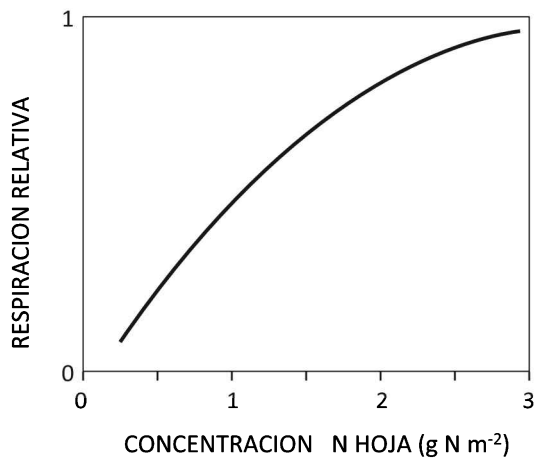


Figura 13.3. Respiración de la hoja a 30ºC en función de la concentración de N por unidad de área foliar.

13.6. LA FOTOSÍNTESIS DEL CULTIVO

La respuesta de la fotosíntesis de un cultivo a las condiciones ambientales, en principio, es más compleja que la de sus hojas individuales. Un cultivo es un conjunto de hojas de distinta edad y diferente concentración de nitrógeno, que se ven some-

tidas a diferentes intensidades de radiación que cambian a lo largo del día. Como se verá más adelante, en muchos casos la fotosíntesis del cultivo se relaciona linealmente con la radiación (o mejor, con la radiación interceptada).

Teniendo en cuenta la extinción de la radiación dentro de la cubierta (Capítulo 3) y la respuesta de la asimilación de la hoja a la radiación (Ec 13.2.) podemos integrar la fotosíntesis para todas las hojas y llegar a una ecuación para la tasa de fotosíntesis neta del cultivo:

$$P_{nc} = \frac{P_{gx}}{k}\, ln\left(\frac{\varepsilon\, k\, I_0 + 1.2\, P_{gx}}{\varepsilon\, k\, I_0 e^{-kL} + 1.2\, P_{gx}}\right) - L\, R_d \qquad (13.4)$$

Donde I_0 es la radiación incidente, k es el coeficiente de extinción (véase el Capítulo 3), L es el índice de área foliar y R_d es la respiración en la oscuridad por unidad de área foliar. Los principales determinantes de la fotosíntesis del cultivo se analizan usando la ec. 13.4 en los ejemplos siguientes.

Ejemplo 12.2.

La figura 13.4 muestra la fotosíntesis neta de cultivos C3 con coeficientes de extinción de 0.5 (hojas verticales) y 0.9 (hojas horizontales) como una función del LAI. La fotosíntesis máxima se produce para LAI alrededor de 3 para hojas horizontales y LAI cercano a 5 para hojas verticales. Cuando el LAI es bajo, las hojas horizontales son más eficientes para la fotosíntesis del cultivo. Las hojas verticales muestran una clara ventaja para LAI elevado.

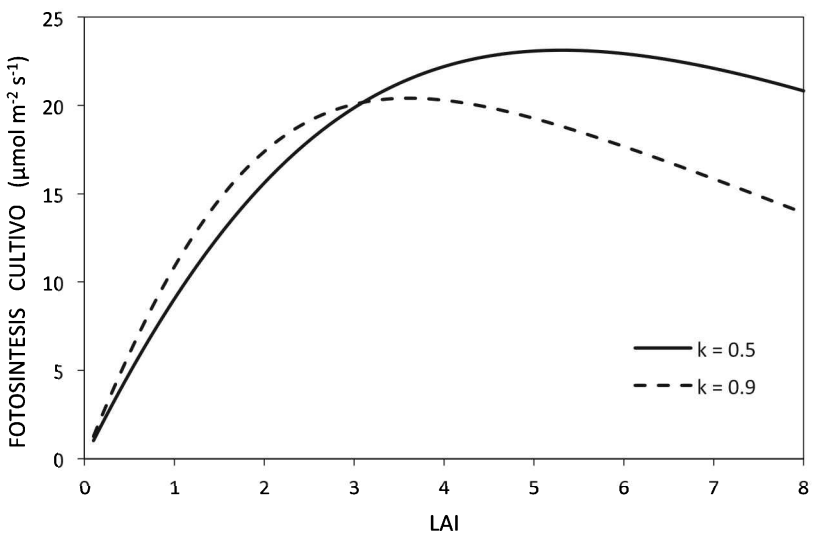


Figura 13.4. Fotosíntesis neta de cultivos C3 con coeficientes de extinción de 0.5 (hojas verticales) y 0.9 (hojas horizontales) en un función del LAI.

Ejemplo 12.2.

La figura 13.5 muestra la fotosíntesis neta de cultivos C3 con LAI = 1 y LAI = 4 como una función de la radiación incidente. La respuesta está más cerca de la lineal que la mostrada por la fotosíntesis de la hoja a la radiación (Fig. 13.1). Cuando la radiación es baja, el cultivo con IAF = 1 asimila más CO_2 lo que se explica por la menor respiración.

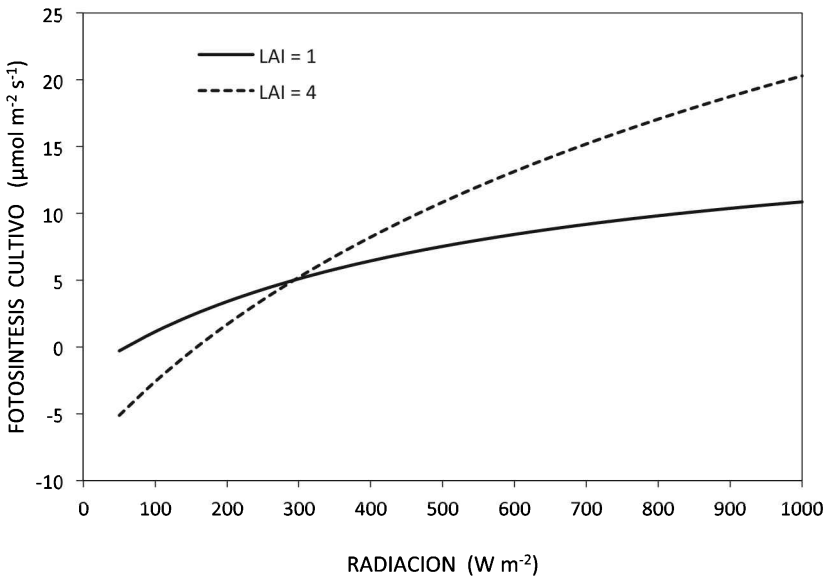


Figura 13.5. Fotosíntesis neta de cultivos C3 con LAI = 1 y LAI = 4 en función de la radiación incidente.

Ejemplo 12.2.

El efecto de la capacidad fotosintética de la hoja sobre la fotosíntesis del cultivo se muestra en la Fig. 13.6 para cultivos con diferente LAI. El rango de la fotosíntesis bruta máxima de la hoja va desde la gama baja de las especies C3 hasta la gama alta de las C4. Hemos asumido que la respiración es el 10% de P_{gx} y que la radiación solar es de 500 W m^{-2}. Está claro que la importancia de la capacidad fotosintética de la hoja se reduce conforme el cultivo es más grande. Para LAI muy alto, la fotosíntesis del cultivo es casi independiente de P_{gx}. Esto puede explicar por qué la mejora para alta P_{gx} no ha tenido éxito en el aumento de la producción de biomasa.

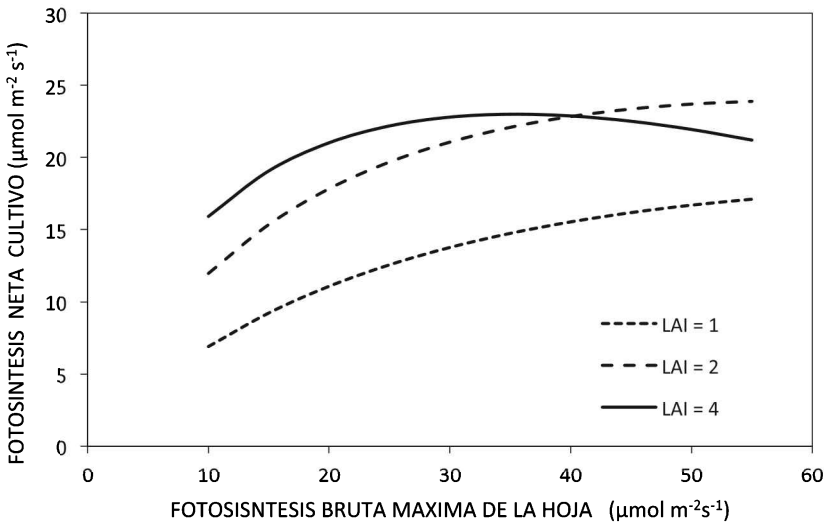


Figura 13.6. Efecto de la capacidad fotosintética de la hoja sobre la fotosíntesis neta del cultivo. El rango de la fotosíntesis bruta máxima de la hoja va desde la gama baja de las especies C3 a la gama alta de las C4. Hemos asumido que la respiración es el 10% de P_{gx} y la radiación solar es de 500 W m^{-2}.

13.7. RADIACIÓN INTERCEPTADA

En el Capítulo 3 se analizó la radiación interceptada por los cultivos. La interceptación depende del LAI, de la distribución de ángulos foliares y de la distribución geométrica de la radiación incidente (ángulo de elevación del sol, fracción de radiación difusa). Los modelos de interceptación de radiación pueden ser bastante complejos y pueden incluso considerar la distribución tridimensional de los elementos del follaje que se requiere para plantaciones de árboles o bosques.

Un enfoque más sencillo utiliza la relación entre la interceptación de radiación y los coeficientes de cultivo que se vió en el Capítulo 10. El método de la FAO para el cálculo de K_c divide el ciclo de cultivo en 4 etapas (inicial, de crecimiento rápido, máximo, en declive). La fase de crecimiento rápido se inicia cuando la cobertura del suelo es de alrededor de 0.2 y termina con una cobertura del suelo de 0.8-0.9. La interceptación completa de radiación corresponde a K_c alrededor de 1.2, lo que conduce al modelo simple:

$$f_i = K_c - 0.3 \tag{13.5}$$

donde f_i es la fracción de PAR interceptada. Esto debería ser válido para la tercera y cuarta etapas. En la etapa inicial, cuando se pasa de cero a 20% de interceptación podemos suponer un valor medio de f_i = 0.1. Los valores de interceptación para la etapa de crecimiento rápido se pueden calcular por interpolación lineal (Fig. 13.7). Nótese que en este modelo simple la radiación interceptada en la cuarta eta-

pa, cuando las hojas van muriendo y el cultivo envejece, refleja en gran medida la caída en radiación absorbida por pigmentos. En otras palabras, las hojas muertas no contribuyen a la fotosíntesis ni a la transpiración, por lo que el valor estimado de radiación interceptada se refiere a hojas funcionales.

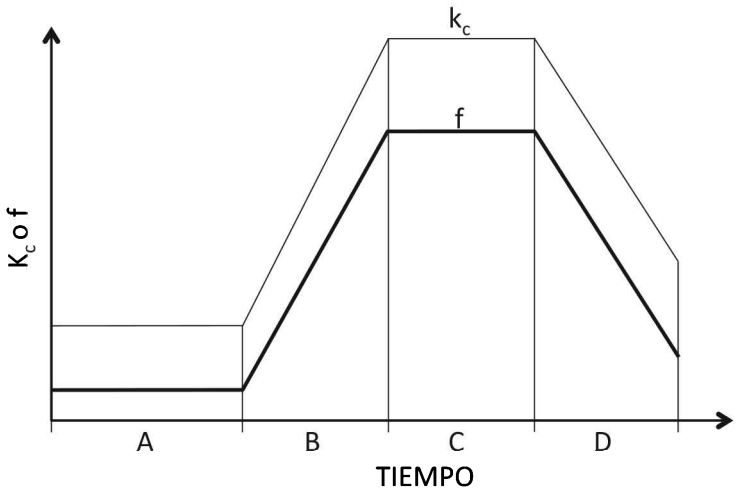


Figura 13.7. Evolución temporal del coeficiente de cultivo y de la fracción de PAR interceptada por un cultivo anual.

13.8. EFICIENCIA EN EL USO DE LA RADIACIÓN

La relación entre la tasa de crecimiento del cultivo (TCC: aumento de la biomasa aérea por unidad de área y de tiempo) y la radiación interceptada es aproximadamente lineal (Figura 13.8). Por lo tanto la relación entre la producción de biomasa (B) y radiación interceptada acumulada debe ser lineal:

$$B = RUE \sum_{emergencia}^{cosecha} f_i R_{sp} \tag{13.6}$$

donde el coeficiente de proporcionalidad es la RUE (Eficiencia en el Uso de la Radiación, en g/(MJ PAR)) y R_{sp} es la radiación PAR incidente. El primero en proponer una relación como esa fue Monteith en 1977, que representó la biomasa frente a la radiación solar interceptada acumulada para diferentes cultivos C3 (remolacha azucarera, patatas, cebada, manzano) y encontró relaciones lineales similares con pendiente alrededor de 1.4 g de materia seca/MJ radiación solar, a pesar de las diferencias obvias entre estos cultivos. La RUE de plantas C3 dentro de los invernaderos es más alta que en el exterior, con valores en el rango 2.2-2.5 g/(MJ PAR), que se explica por la mayor proporción de radiación difusa, el ambiente térmico favorable y la falta de viento que promueve un mayor cociente parte aérea/raíz.

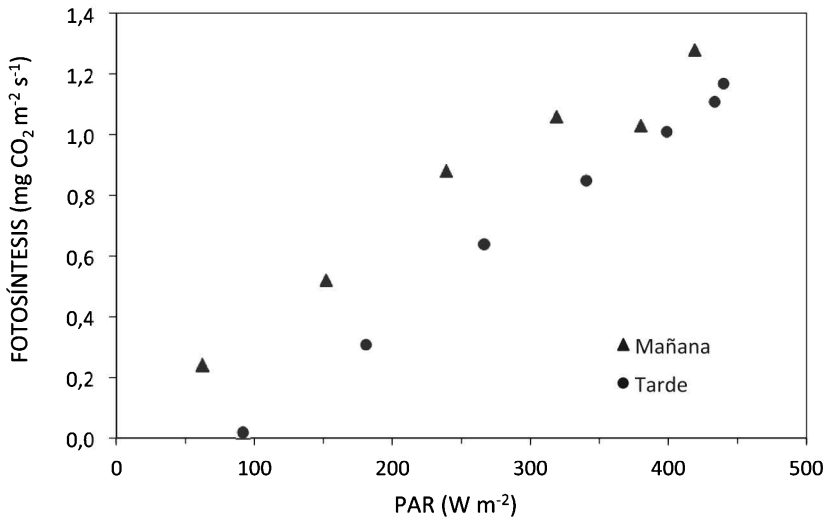


Figura 13.8. Relación entre la fotosíntesis neta horaria y la PAR interceptada por un cultivo de algodón. Córdoba, España. 23 de junio de 2003. Por la misma radiación la fotosíntesis es más alta durante la mañana que por la tarde.

13.9. PRODUCTIVIDAD POTENCIAL DEL CULTIVO

Podemos calcular el rendimiento del cultivo (Y) como el producto de la biomasa y del índice de cosecha (13.10), y expresando además la biomasa como el producto de RUE y PAR interceptada total (ec. 13.6):

$$Y = HI \;\; RUE \sum_{emergencia}^{cosecha} f_i \, R_{sp} \tag{13.7}$$

Suponiendo cultivos bajo condiciones ideales que maximizan la captura y la eficiencia en el uso de la radiación y el índice de cosecha, se puede calcular el rendimiento potencial de materia seca de un cultivo en un entorno determinado. Los factores de estrés abiótico y biótico pueden reducir el índice de cosecha (13.10), y los componentes de la biomasa del cultivo (secciones 13.10 y 13.11). Es importante tener en cuenta que una fracción de la masa cosechada por los agricultores es agua. Por lo tanto el rendimiento comercial o fresco puede ser calculado usando la Ec. 13.7 como:

$$Y_{fresco} = \frac{1}{1-w} \; HI \;\; RUE \sum_{emergencia}^{cosecha} f_i \, R_{sp} \tag{13.8}$$

donde w es la fracción de agua sobre peso fresco. Los valores de w para diferentes especies se muestran en la Tabla 24.1. La diferencia entre Y y Y_{fresco} es pequeña para los cultivos que se recolectan secos (cereales, leguminosas de grano), pero es muy grande para algunas especies (p.ej., patata, tomate).

La fracción de biomasa que se cosecha se denomina Índice de cosecha (HI = Y/B). La biomasa generalmente se refiere sólo a la fracción aérea, a menos que el órgano cosechado sea subterráneo, en cuyo caso se incluye en la biomasa. El HI de los cultivos forrajeros es muy alto (hasta 0.9), ya que podemos cosechar y utilizar casi toda la biomasa aérea (véase la Tabla 13.1). Los cereales como el trigo pueden alcanzar HI cerca de 0.50, y muchos cultivos de leguminosas y oleaginosas muestran HI en el rango de 0.30-0.40. Los cultivos con órganos cosechables subterráneos muestran un alto HI como la remolacha azucarera (hasta 0.7) y la patata (hasta 0.8). Debe recordarse, sin embargo, que los valores que se muestran en la Tabla 13.1 corresponden a condiciones "normales" de cultivo, y que en situaciones extremas el HI puede bajar a cero, por ejemplo, por heladas o golpes de calor en la fase de determinación del número de granos.

Tabla 13.1. Indice de Cosecha (%) de diferentes especies cultivadas. Se muestran los intervalos típicos para cultivos comerciales. Estos valores pueden ser tomados como representativos de cultivos que no sufren estrés biótico o abiótico extremo.

	HI_{min}	**$HI_{máximo}$**
Alfalfa	90	90
Manzano	60	70
Cebada	40	50
Mandioca	30	65
Garbanzo	30	36
Cítricos	50	60
Algodón	25	40
Caupí (determinado)	44	60
Caupí (indeterminado)	15	30
Judía (semilla seca)	25	45
Haba	25	40
Ajo	50	55
Sorgo (grano)	40	50
Vid	40	60
Lenteja	35	50
Altramuz	30	50
Maíz	40	55
Avena	40	50
Palmera de aceite	40	45

Olivo	50	70
Cebolla	60	85
Adormidera	30	40
Guisante	35	45
Cacahuete	35	42
Pimiento	40	60
Patata	50	80
Colza	30	35
Arroz	40	55
Cártamo	25	35
Soja	35	50
Remolacha azucarera	50	70
Caña de azúcar	70	80
Girasol	25	40
Tabaco	60	80
Tomate (industria)	45	60
Triticale	45	47
Veza	40	50
Trigo	40	50

13.10. DISTRIBUCIÓN DE MATERIA SECA E ÍNDICE DE COSECHA

La materia seca acumulada durante el ciclo de cultivo se reparte entre los diferentes órganos de la planta. En cultivos anuales de crecimiento determinado hay una fase de crecimiento vegetativo en la que los asimilados se reparten entre hojas, tallos y raíces. Esta fase va seguida de una fase reproductiva en la que crecen inflorescencias, flores, semillas y estructuras de soporte mientras se detiene el crecimiento vegetativo. En las plantas con un hábito de crecimiento indeterminado, los crecimientos vegetativo y reproductivo se superponen durante gran parte del ciclo. La diferencia entre crecimiento determinado e indeterminado es relativa en el sentido de que siempre habrá un cierto solape entre crecimiento vegetativo y reproductivo. Cuanto más corto sea ese solape, más determinado será el hábito de crecimiento. Curiosamente existe variabilidad genética de hábito de crecimiento que ha sido explotada para desarrollar cultivares determinados que permiten la recolección mecánica (p.ej., el tomate para procesado).

La fracción de materia seca que va a cada órgano de la planta se llama coeficiente de reparto. Parte de la materia seca puede ser removilizada más tarde y ser transportada de un órgano a otro. Esto ocurre normalmente con los carbohidratos

de reserva en el tallo, que contribuyen parcialmente al crecimiento de las semillas durante el periodo de llenado del grano. En cultivos como el girasol y el trigo, las reservas pueden contribuir de manera significativa al rendimiento de grano, en particular, en condiciones de restricción de la fotosíntesis durante el llenado del grano, que puede ocurrir por sequía o por enfermedades foliares.

La tendencia general durante el siglo XX fue el aumento del Índice de Cosecha de los diferentes cultivos, lo que ha permitido un aumento significativo en el rendimiento sin grandes mejoras en la producción de biomasa. Un ejemplo es el de las variedades de trigo obtenidas por el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) en las que el mayor HI estuvo asociado a plantas de baja estatura que permitieron aumentar la fertilización N sin aumentar el riesgo de encamado. El maíz es una excepción a esta tendencia, ya que la mejora en el rendimiento se ha logrado principalmente mediante el aumento de la biomasa mediada por la tolerancia al estrés por densidad, que, a su vez, permite una mayor densidad de siembra. Durante los últimos cincuenta años, los mejoradores de plantas han centrado sus programas de mejora en el aumento de HI hasta el punto de que los principales cultivos se están acercando a sus límites biofísicos en términos de HI.

El índice de cosecha depende principalmente del patrón de desarrollo del cultivo, de la distribución de asimilados entre los órganos de la planta y de la capacidad para traslocar asimilados al órgano cosechable. En particular en cultivos determinados (p.ej. girasol) la fase reproductiva está claramente separada en el tiempo de la fase vegetativa. El fracaso en el establecimiento de semillas (u órganos cosechables en general) puede ser una causa mayor de la reducción del HI. Más tarde, una baja asimilación en post-antesis o una pobre translocación de asimilados pueden reducir aún más el HI. Por lo tanto pueden existir varios períodos críticos para la determinación del HI (iniciación floral, floración, polinización). Una mayor flexibilidad del HI se puede esperar para los cultivos indeterminados (p.ej. algodón) al superponerse el crecimiento vegetativo y el reproductivo durante la mayor parte del ciclo.

Los déficits de agua o nutrientes tienen efectos variables sobre el índice de cosecha. Esto se relaciona con la definición del índice de cosecha como el cociente entre rendimiento y biomasa. El estrés puede reducir tanto la biomasa como el rendimiento en la misma proporción, sin consecuencia para el índice de cosecha, o reducir proporcionalmente más la biomasa que el rendimiento, aumentando el índice de cosecha, o reducir el rendimiento proporcionalmente más que la biomasa, lo que reduce el índice de cosecha. La respuesta real del índice de cosecha al estrés se encuentra pues supeditada a la naturaleza del estrés, y al momento de ocurrencia, a su intensidad y a su duración. La Tabla 13.2 ilustra las tres posibilidades. En comparación con los cultivos no fertilizados, los cultivos bien fertilizados tuvieron un índice de cosecha similar, menor o mayor dependiendo de las condiciones de cultivo específicas de cada lugar. La estacionalidad de las lluvias en zonas áridas a menudo tiene un impacto sobre el rendimiento mediado por el índice de cosecha. En ambientes mediterráneos con lluvias de invierno que favorece el crecimiento de la biomasa y escasez de lluvias durante las etapas reproductivas, el índice de cosecha es a menudo mucho más bajo que su potencial. En los cultivos de regadío, las estrategias de rie-

go deficitario se pueden utilizar para mejorar el HI al reducir el uso de agua durante períodos específicos que favorecen la reproducción sobre el crecimiento vegetativo (véase el Capítulo 21).

Tabla 13.2. Efecto del suministro de nitrógeno sobre el índice de cosecha (en relación a un valor máximo de 0.47) de trigo en tres lugares de Australia. Adaptado de van Herwaarden et al. 1998. Austr J Agri Res 49, 1067-1082.

Dosis de N (kg N/ha)	Ginninderra	Pucawan	Wagga
0	0.94	0.89	0.72
200	1.00	0.85	0.55

13.11. FACTORES DEL CULTIVO QUE AFECTAN A LA INTERCEPTACIÓN Y LA EFICIENCIA EN EL USO DE LA RADIACIÓN

En el Capítulo 3 se discuten las características de los cultivos que afectan a la radiación interceptada, incluidas las propiedades ópticas y geométricas de las hojas y de las cubiertas. La RUE, que es la cantidad de materia seca producida por unidad de PAR interceptada, depende de la especie. Bajo condiciones óptimas de temperatura y suministro de agua las plantas C3 producen entre 2-2.5 g/MJ PAR y las C4 producen 2.5-3.0 g/MJ PAR.

Las diferencias en la composición de la semilla explican la mayor RUE de los cereales en comparación con las oleaginosas y las leguminosas de grano. Partiendo de los datos de Penning de Vries, el factor de conversión para la formación de materia seca (CVF: g de materia seca/g de glucosa) se puede calcular como:

$$1/\mathrm{CVF} = (1.24\ \mathrm{FC}+1.70\ \mathrm{FP}+3.11\ \mathrm{FF}+2.17\ \mathrm{FL}+0.93\ \mathrm{FO}+0.05\ \mathrm{FM}) \quad (13.9)$$

donde FC, FP, FF, FL, FM y FO representan las fracciones de hidratos de carbono, proteínas, grasas, lignina, minerales y ácidos orgánicos, respectivamente, en la materia seca que se forma. Con estos valores se puede proponer un método aproximado para calcular la RUE de un cultivo basado en la composición de la biomasa, en el supuesto de que el producto cosechado se compone de hidratos de carbono, proteínas y grasas, y que los residuos del cultivo contienen sólo hidratos de carbono:

$$RUE = \frac{RUE_c}{(1 - HI) + HI\ (FC + 1.4\ FP + 2.5\ FF)} \quad (13.10)$$

donde RUE_c es la RUE para la producción de hidratos de carbono. El Apéndice 32.1 (Capítulo 32) presenta los datos de composición de las partes cosechadas de muchas especies cultivadas.

Ejemplo 13.4.

Los cereales de invierno tienen una RUE estacional en torno a 2 g/(MJ PAR), que puede ser tomado como referencia de RUE_c. Para el girasol oleaginosos con HI = 0.35 y semillas que contienen 45% de grasa y 20% de proteína, la RUE será:

$$RUE = \frac{2}{(1-0.35)+0.35\,(0.35+1.4\,x\,0.2+2.5\,x\,0.45)} = 1.58\ g/(MJ\ PAR)$$

Ejemplo 13.4.

Vamos a calcular el rendimiento potencial (sin limitación de agua y nutrientes) del ricino (Ricinus communis) en Córdoba, (España). El cultivo se siembra el 1 de abril y se cosecha el 30 de septiembre. La fracción media de radiación interceptada es de 0.2 en abril, 0.4 en mayo, 0.9 en junio, julio y agosto y 0.2 en septiembre. El índice de cosecha es de 0.25. El contenido de agua de la semilla es del 5%. La semilla de ricino contiene 50% de grasa y 15% de proteína (en base a la masa seca).También suponemos que la temperatura no afecta a la productividad del cultivo. Los datos de radiación solar y cálculo de la interceptación de PAR se presentan en la Tabla 13.3. La radiación PAR interceptado en todo el ciclo es de 1106 MJ m^{-2}.

En primer lugar se calcula la RUE utilizando la ecuación 13.10 y asumiendo RUE_c = 2 g/(MJ PAR), que nos da:

$$\mathrm{RUE} = 1{,}66\ \mathrm{g/(MJ\ PAR)}$$

Y ahora se calcula el rendimiento aplicando la ecuación 13.8:

$$Y_{fresh} = \frac{1}{1-w}\ HI\ \ RUE \sum_{emergencia}^{cosecha} f_i R_{sp} = \frac{1}{1-0.05}\ 0.25 \cdot 1.66 \cdot 1106 = 483\ g\ m^{-2} = 4830\ kg/ha$$

Las variaciones en RUE debido a la composición del producto cosechado y a la pérdida de capacidad fotosintética que se produce en muchos cultivos durante la fase final del ciclo, reducen la RUE estacional por debajo de los valores máximos. Por lo tanto, para el cálculo de rendimientos proponemos intervalos de RUE estacional de 1.6-2.0 g/(MJ PAR) para las plantas C3 no leguminosas, 1.5-1.8 para las leguminosas y 2.2-3.0 g/(MJ PAR) para las plantas C4. Estos valores representan la RUE de cultivares "bien adaptados" a las condiciones normales de cultivo, por lo que los valores de RUE incluyen el efecto de la temperatura y asumen buen suministro de agua y nutrientes. Sin embargo, cabe esperar que la RUE cambie en ambientes más fríos o más cálidos, o cuando el agua o los nutrientes sean escasos, como se explica en la siguiente sección.

Tabla 13.3. Cálculo de la radiación interceptada por un cultivo de ricino en Córdoba (España).

Mes	Rs	PAR	Días /mes	f	PAR interceptada por mes MJ/m^2
	MJ/ m^2/d				
1	8.8	4.0	31	—	—
2	9.9	4.4	28	—	—
3	11.7	5.2	31	—	—
4	16.9	7.6	30	0.2	45.7
5	20.1	9.1	31	0.4	112.3
6	23.8	10.7	30	0.9	289.7
7	25.1	11.3	31	0.9	315.4
8	23.5	10.6	31	0.9	295.4
9	17.8	8.0	30	0.2	48.0
10	10.9	4.9	31	—	—
11	8.0	3.6	30	—	—
12	6.3	2.8	31	—	—
Ciclo					1106.4

Algunas especies muestran una baja RUE debido a su baja fotosíntesis a nivel de la hoja; por ejemplo, la RUE de olivo es de 1.3 g/(MJ PAR) para árboles jóvenes aún no productivos y 0.9 g/(MJ PAR) para árboles productivos. Esta diferencia se debe fundamentalmente a los mayores costes de producción de biomasa de los árboles en producción ya que los frutos acumulan aceite. En cítricos la RUE de árboles adultos es de 1.3 g/(MJ PAR).

La variación intraespecífica en RUE es más pequeña que las diferencias entre especies asociadas con el metabolismo fotosintético y la composición de la semilla. No obstante, la presión selectiva para el rendimiento ha mejorado la eficiencia en el uso de radiación de trigo, tanto en entornos favorables (Reino Unido) como sometidos a estrés (Australia) (Fig 13.9). La mejora de la RUE antes de floración de los trigos australianos se asoció con una mayor absorción de nitrógeno (es decir, hojas más verdes), y a cambios en la arquitectura del dosel que favorecieron una mayor penetración de PAR en el perfil de hojas; efectivamente, las variedades más modernas tienen una mayor proporción de hojas que contribuyen a la fotosíntesis total del cultivo, mientras que la fotosíntesis por unidad de área foliar se ha mantenido sin cambios. El papel del nitrógeno en la fotosíntesis de los cultivos se discute en la siguiente sección.

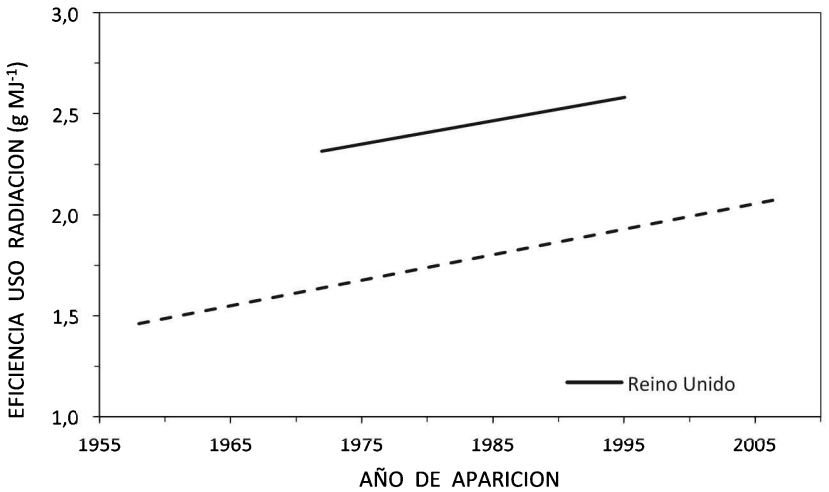


Figura 13.9. La selección para rendimiento ha mejorado indirectamente la eficiencia en el uso de la radiación en pre-floración de variedades de trigo en el Reino Unido y en Australia. Adaptado de Evans JR (2013) Plant Physiol 162:1780-1793

Un valor estacional de RUE es útil para las comparaciones entre tipos de cultivos (C3 versus C4, cereales vs oleaginosas) y también captura los principales efectos ambientales, tales como la escasez de agua o de nitrógeno (sección siguiente). Sin embargo, la RUE cambia con la edad del cultivo, la etapa de desarrollo y el patrón de distribución del nitrógeno y la materia seca. Por ejemplo, los estudios de RUE en girasol mostraron tres fases: establecimiento (desde siembra hasta 47 días después), crecimiento rápido (desde 47 días después de la siembra hasta antesis) y llenado del grano (de antesis a madurez). La eficiencia en el uso de radiación fue más alta durante el crecimiento rápido (2.4 g/MJ) e inferior durante el establecimiento (1.0 g/MJ) y llenado del grano (1.3 g/MJ). La baja RUE durante el establecimiento se asoció con una gran proporción de las hojas expuestas a la alta radiación y a la menor eficiencia de las hojas a intensidades saturantes de radiación. La baja RUE durante el llenado del grano estaba relacionada con la respiración y el alto coste de síntesis de aceite y proteína en la semilla (ver ec. 13.10) y a la senescencia de las hojas.

El concepto de fuente y sumidero es útil para entender la fisiología del cultivo, a pesar de algunos problemas en las definiciones. Una hoja adulta es una fuente neta de carbono, mientras que la semilla que crece es un sumidero. Sin embargo, una hoja pasa de ser sumidero en la etapa temprana de crecimiento a ser una fuente en etapas posteriores. Del mismo modo, los tallos de trigo y girasol tallos son sumideros de los hidratos de carbono durante la primeras etapas de crecimiento, pero se convierten más tarde en fuentes de carbohidratos para el llenado del grano. La relación fuente:sumidero puede ser manipulada experimentalmente mediante el aumento de

la actividad de la fuente (p.ej. el aumento de la concentración de CO_2 o de la radiación), la reducción de la actividad de la fuente (p.ej. defoliación, sombreado), la reducción de la actividad del sumidero (p.ej. la eliminación de la mazorca de maíz, el enfriamiento de los tubérculos de patata), o el aumento de la actividad del sumidero (p.ej., la aplicación de ácido giberélico). Los experimentos en los que se disminuye la relación fuente:sumidero a menudo muestran un aumento en la fotosíntesis, mientras que el aumento fuente:sumidero puede reducir la fotosíntesis. Con una alta fuente:sumidero, la planta tiene un exceso relativo de fotosintatos, y la acumulación de almidón en las hojas puede desencadenar la respuesta de inhibición de la fotosíntesis, por lo general mediada por la reducción en la conductancia estomática. Por el contrario, la fotosíntesis de las hojas puede ser estimulada si la capacidad de la fuente para satisfacer la demanda de carbohidratos del sumidero está restringida. Estas interacciones fuente:sumidero son agronómicamente importantes. Por ejemplo, en especies de pastos, como la alfalfa o algunas gramíneas, el pastoreo reduce el tamaño de la parte aérea en relación con la biomasa de raíces, y por lo tanto la relación fuente:sumidero se ve reducida. Después de la defoliación, la tasa de fotosíntesis de las hojas remanentes puede aumentar en respuesta a la baja relación fuente:sumidero, contribuyendo así a un nuevo crecimiento. Esta "fotosíntesis compensatoria" también se ha observado en las plantas después de los daños causados por insectos que reducen la relación fuente:sumidero (p.ej., defoliadores). En las variedades de trigo desarrolladas en el CIMMYT (Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo), el aumento del número de semillas en las variedades modernas, en comparación con las más antiguas, ha incrementado la RUE durante el llenado del grano; este aumento en la fotosíntesis de los cultivos se ha interpretado en términos de una reducción de la relación F:S, ya que el número de granos aumentó sin un aumento proporcional en el tamaño de las plantas. Efectivamente, el mayor número de granos está estimulando el incremento de la fotosíntesis.

13.12. LOS FACTORES AMBIENTALES Y DE MANEJO QUE AFECTAN A LA INTERCEPTACIÓN Y A LA EFICIENCIA EN EL USO DE LA RADIACIÓN

Los efectos de la temperatura sobre la producción de biomasa y sus componentes, la interceptación de radiación y la RUE, son dobles. En primer lugar, y más importante, la temperatura cambia la duración del período desde la siembra hasta la cosecha, que son los límites de integración en la ec. 13.7. En latitudes altas de Europa, Asia y América del Norte, el calentamiento en las últimas décadas ha extendido este período, con implicaciones positivas para el crecimiento y el rendimiento de los cultivos (Capítulo 11). Por el contrario, el aumento de la temperatura en ambientes subtropicales y templados puede acortar la duración del ciclo, con efectos potencialmente negativos para el rendimiento. La primera observación por Westlake por lo tanto sigue siendo relevante en este contexto: "... la adaptación de las técnicas agrícolas para aumentar la proporción del año con el suelo completamente cubierto por cultivos es probablemente el cambio con mayor impacto que se podría hacer para aumentar el suministro de alimentos del mundo ...". En segundo lugar, la

relación entre RUE y temperatura no es lineal, ya que se ve mediada por los efectos de la temperatura en procesos de nivel inferior, tales como la fotosíntesis bruta, la respiración y la distribución de materia seca. Por ejemplo, la RUE del guisante se reduce con temperaturas ambiente medias por debajo de 12ºC o superiores a 22ºC.

La distancia entre líneas es manipulada para mejorar la captura y la eficiencia en el uso de los recursos, y para dar cabida a prácticas tales como el control de malas hierbas y el laboreo (Capítulo 17). La distancia óptima entre líneas para un caso concreto (cultivo, suelo, clima y sistema de cultivo) se determina normalmente de forma empírica. Alternativamente, podemos aplicar los conceptos fisiológicos desarrollados en este capítulo para predecir las respuestas del rendimiento de los cultivos a la distancia entre líneas, como se ilustra en la Fig. 13.10. Para los cultivos bien regados de maíz, soja y girasol, no se esperan aumentos del rendimiento por reducción de la distancia entre líneas cuando los cultivos con calles anchas interceptan más del 90% de la radiación en el período crítico de determinación del rendimiento. Sin embargo se puede aumentar hasta un 12% el rendimiento si partimos de cultivos con calles anchas que sólo interceptan entre el 60 y el 90% de la radiación. La ganancia en el rendimiento con la reducción de la distancia entre líneas es proporcional a la ganancia de radiación interceptada (Fig. 13.10). En las últimas décadas, a pesar de que el espaciamiento entre hileras ha ido disminuyendo para aumentar la radiación interceptada, en la práctica son las características de la sembradora y las prácticas de laboreo/tráfico los principales determinantes de la distancia entre líneas.

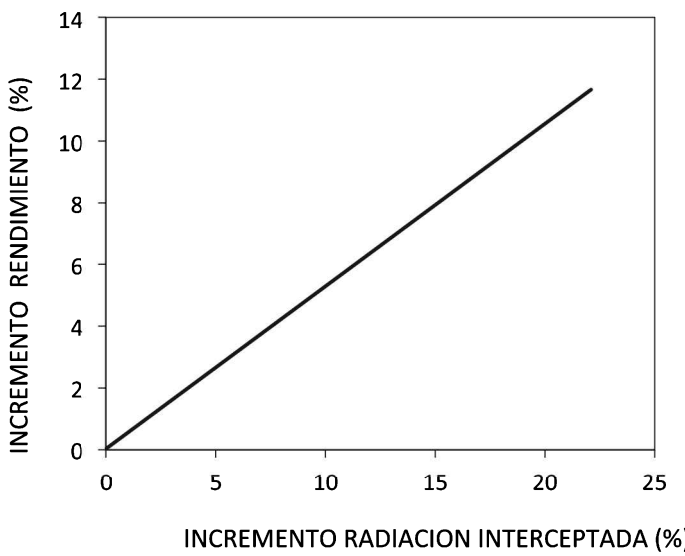


Figura 13.10. Relación entre el aumento de porcentaje de rendimiento en respuesta a aumento en la interceptación de radiación debido a la reducción de la distancia entre líneas de maíz, soja y girasol. Adaptado de Andrade et al. (2002) Agron J 94:975-980

BIBLIOGRAFÍA

Connor DJ, Loomis RS, Cassman KG (2011) Crop ecology: productivity and management in agricultural systems (2nd ed) Cambridge University Press

Hay R, Porter J (2006) The physiology of crop yield (2nd ed) Wiley-Blackwell.

Monteith J L (1977) Climate and the efficiency of crop production in Britain. Phil Trans R SocLond B 281:277–94.

Sadras VO,Calderini DF (2014) Crop Physiology (2nd ed), Academic Press, San Diego, CA.

Capítulo 14

Efectos del estrés hídrico en la producción de los cultivos

V.O. SADRAS
F.J. VILLALOBOS
F. ORGAZ
E. FERERES

RESUMEN:

El estrés hídrico es debido a un bajo potencial de agua en la planta como resultado de un bajo potencial de agua del suelo, de una alta demanda evaporativa y/o de una resistencia sustancial al flujo de agua a través de la planta. El déficit de agua afecta a muchos procesos en el cultivo, aunque la mayoría de los efectos están relacionados con la reducción en el crecimiento, el proceso más sensible, y con el cierre de estomas. Los déficits leves a moderados no afectan al índice de cosecha, y en algunas especies pueden aumentarlo. El déficit hídrico severo reduce el HI. El efecto del estrés hídrico en el rendimiento del cultivo puede ser cuantificada por la ecuación de Stewart que establece que la reducción relativa en el rendimiento es directamente proporcional a la reducción relativa de la ET, con un coeficiente de proporcionalidad empírico (K_y) que varía entre 0.8 y 1.5. Se pueden usar otros modelos de tipo mecanicista para caracterizar las respuestas del rendimiento a un suministro de agua variable, pero necesitan ser calibrados de forma local para conseguir suficiente precisión.

14.1. INTRODUCCIÓN

Las plantas cultivadas requieren un suministro continuo de agua para reemplazar la que se pierde por evaporación a partir de los órganos aéreos, en particular de las hojas. Este requisito se debe simplemente al hecho de que las hojas están expuestas a una alta demanda de evaporación (radiación solar y de onda larga y aire caliente y seco), mientras que las cavidades subestomáticas están saturadas con vapor de agua. El gradiente de potencial hídrico entre la cavidad subestomática y la superficie de la hoja por lo tanto gobierna el proceso de evaporación. La cutícula de la hoja, sin embargo, es una barrera significativa para la evaporación, lo que lleva a que la mayor parte del flujo de transpiración ocurra a través de los estomas. Para que el dióxido de carbono pueda entrar en las hojas, los estomas deben estar abiertos, permitiendo que el vapor de agua se escape en respuesta al gradiente de presión de vapor. Para mantener el flujo de agua sin desecación del tejido, las plantas terrestres han desarrollado complejos sistemas para la captación y el transporte de agua. El agua fluye desde el suelo hasta las raíces y luego es transportada por los vasos del xilema a las hojas, donde sustituyen al agua que se evapora hacia la atmósfera. Por lo tanto, desde un punto de vista puramente físico, las plantas transportan agua desde una fuente, el suelo, a un sumidero, la atmósfera. Estos sistemas son capaces de transportar grandes cantidades de agua, equivalentes, en un día típico de verano a una profundidad de agua de 6-8 mm, lo que supone varias veces el peso total de la planta. Sin embargo, un pequeño desequilibrio, apenas detectable, en el proceso de transporte en respuesta a un cambio en el suministro de agua desde el suelo o de la demanda atmosférica, provoca un déficit de agua en la planta. Estos déficits leves que a menudo son perjudiciales para el crecimiento del cultivo y el rendimiento pueden ocurrir a pesar de las grandes cantidades de agua utilizadas por las plantas. En este capítulo, se describe el concepto de estado de energía del agua en la planta, y su papel como fuerza impulsora de los flujos de agua. A continuación nos fijamos en las respuestas de los procesos del cultivo a los déficit hídricos y los mecanismos de regulación de la transpiración de los cultivos. Después de establecer estos principios, se concluye con un análisis de los vínculos más importantes entre el agua y la producción de cultivos desde un punto de vista agronómico.

14.2. ESTADO ENERGÉTICO DEL AGUA EN LA PLANTA

Como hemos visto ya para el suelo (Capítulo 8), el estado energético del agua en la planta se puede caracterizar en términos de potencial de agua. Para ello hay que bajar hasta el nivel celular, ya que el estado del agua varía entre los compartimentos subcelulares.

Esquemáticamente una célula de la planta es un protoplasto (núcleo, citoplasma y vacuolas) rodeado por una membrana (plasmalema) que presiona sobre una pared celular semi-rígida. Esta presión, llamada turgencia, refleja el potencial de turgencia (Ψ_p). El potencial osmótico (Ψ_o) debido a la presencia de solutos es el otro compo-

nente principal del potencial total de agua (Ψ) en el protoplasto. En la pared celular, una estructura porosa compuesta de microfibras y polisacáridos, la concentración de solutos es mucho menor, por lo Ψ_o es muy pequeño y Ψ_p es cero. Por lo tanto, el componente principal del potencial fuera del protoplasto es el potencial matricial (Ψ_m) debido a las fuerzas de adsorción que la matriz de la pared celular porosa ejerce sobre el agua. Otro componente del potencial, el gravitatorio es despreciable en las plantas excepto en árboles muy altos.

Ejemplo 14.1.

En una situación de equilibrio el potencial de agua en la vacuola es -0.5 MPa con componentes Ψ_p = 0.2 MPa y Ψ_o = -0.7 MPa. El potencial total de la pared celular es también -0.5 MPa. Sus componentes son Ψ_m = -0.48 MPa y Ψ_o = -0.02 MPa.

Fuera de la célula, en el xilema, para el mismo potencial de agua, sus componentes serán diferentes que en la célula. El Ψ_o es mucho menor y Ψ_p es negativo ya que el agua en el xilema está bajo tensión. De hecho, la turgencia en el protoplasto y la tensión fuera del mismo crea un gradiente de presión muy grande que podría rasgar el plasmalema si no fuera por la rigidez de la pared celular que lo contiene.

El potencial de presión es el principal motor del crecimiento expansivo de los tallos y las hojas de las plantas y es en gran parte responsable del buen funcionamiento de algunos procesos básicos para el crecimiento y la producción de cultivos.

14.3. LAS CAUSAS DEL DÉFICIT HÍDRICO

Desde el suelo hasta la cavidad subestomática, el agua se mueve en fase líquida mientras que el flujo desde la cavidad subestomática a la atmósfera se produce en fase de vapor. La transpiración (E_p) es el flujo de vapor de agua desde las cavidades subestomáticas a la atmósfera siguiendo un gradiente de presión de vapor. Esta pérdida de agua de la planta es compensada por el flujo de entrada debido a la absorción de agua del suelo por el sistema radical. El flujo de agua puede ser expresado en función del gradiente de potencial de agua entre el suelo y las hojas:

$$E_p = (\Psi_s - \Psi_l) / R_{sl} \qquad (14.1)$$

donde Ψ_s es el potencial hídrico del suelo, Ψ_l es el potencial hídrico de la hoja y R_{sl} es la resistencia al flujo entre el suelo y las hojas. Reordenando la ecuación 14.1:

$$\Psi_l = \Psi_s - E_p R_{sl} \qquad (14.2)$$

Es decir, el potencial hídrico de la hoja, que es siempre menor que Ψ_s, es una función del potencial hídrico del suelo, de la resistencia al flujo y de la tasa de transpiración. Un bajo potencial de agua de la hoja es requerido para que el agua sea extraída del suelo, por lo que las hojas están bajo déficit hídrico, siempre y cuan-

do haya transpiración. Sin embargo, se considera que una planta sufre estrés hídrico cuando el potencial de agua en sus tejidos disminuye lo suficiente como para afectar a los procesos fisiológicos. Por lo tanto, las causas que pueden conducir a un bajo potencial hídrico en hoja y por lo tanto al déficit hídrico son:

a) bajo potencial de agua en el suelo (bajo contenido de agua y/o alta concentración de sales en la solución del suelo).

b) alta demanda de evaporación (alta E_p).

c) alta resistencia al flujo de agua (alta R_{si}) en el suelo (baja conductividad hidráulica, suelo seco) o en la planta (baja densidad de longitud de raíces, enfermedades vasculares, etc.).

Estos procesos pueden actuar simultáneamente y en la misma o en opuesta dirección. Por ejemplo, un bajo potencial de agua en el suelo provoca un aumento en la resistencia desde el suelo a la raíz, mientras que los aumentos de la transpiración pueden ir acompañados de una reducción de la resistencia.

El déficit de agua se puede producir a corto plazo en plantas con buen suministro de agua durante el período central del día, en respuesta a una mayor demanda evaporativa. Por el contrario, los déficits de agua a largo plazo se asocian comúnmente con el agotamiento progresivo del agua en el suelo.

Hemos visto entonces que el estado del agua de la planta es el resultado de interacciones entre la demanda atmosférica (E_p) y la capacidad de la planta para satisfacer esta demanda, que depende del contenido de agua en el suelo y de la resistencia al flujo. Las tasas de transpiración y la absorción de agua del suelo siguen patrones diurnos similares, con un máximo cerca del mediodía, debido a la alta demanda de evaporación, pero están desfasadas en el tiempo (Figura 14.1).

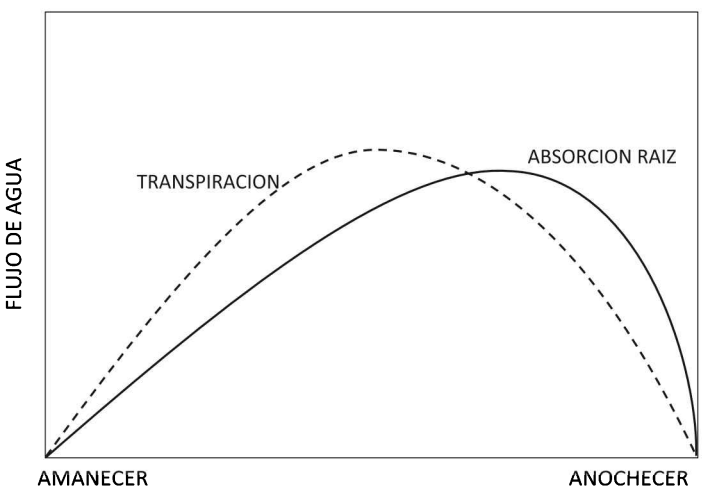


Figura 14.1. Variación diurna de la transpiración y la absorción de agua.

El papel de R_{sl} es crítico en la regulación del flujo de agua entre el suelo y la atmósfera. La resistencia entre el suelo y las hojas se puede descomponer en varias resistencias, como se indica esquemáticamente en la Figura 14.2. La resistencia entre el suelo y la raíz depende de la conductividad hidráulica del suelo (K_h), de la densidad de longitud de raíces (L_v) y de la resistencia radial de la raíz. A medida que el suelo se seca, K_h disminuye exponencialmente y aumenta R_{sl}. La densidad de longitud de raíces (longitud de raíz por unidad de volumen de suelo) por lo general disminuye exponencialmente con la profundidad. Una alta L_v implica una distancia media más corta entre el suelo y la superficie de las raíces individuales y por lo tanto una menor R_{sl}.

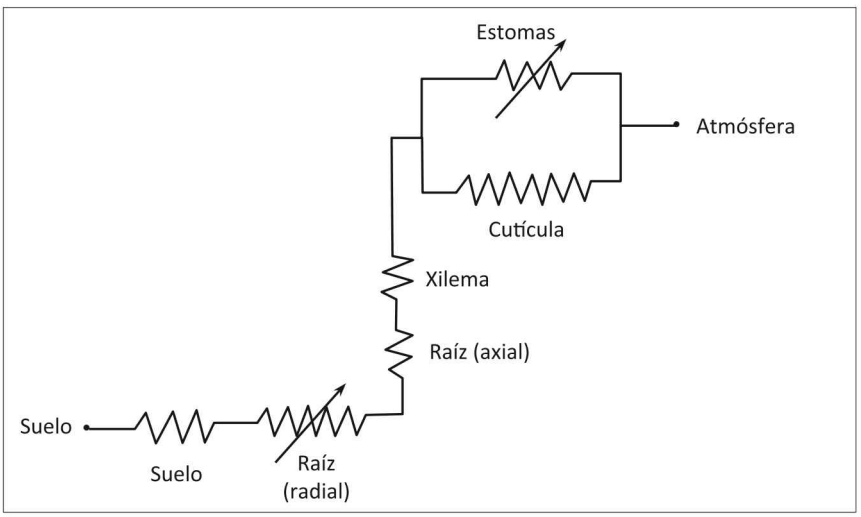


Figura 14.2. Diagrama del flujo de agua en el sistema suelo-planta-atmósfera.

Los cereales tienen una mayor densidad de longitud de raíces que las dicotiledóneas para cultivos de tamaño similar (Fig. 14.3), alcanzando L_v entre $3 \cdot 10^4$ y $10 \cdot 10^4$ m m^{-3} en el horizonte superficial (0-30 cm). La menor densidad de longitud de raíces de las dicotiledóneas, que puede sostener cubiertas de tamaño similar, se ve compensada por vasos de metaxilema más grandes y más abundantes y una menor resistencia axial al flujo de agua. Numerosos estudios han demostrado que con L_v alrededor de $1 \cdot 10^4$ m m^{-3} es suficiente para agotar el agua del suelo hasta el punto de marchitez. De hecho, algunos cultivos como el girasol son capaces de extraer todo el agua del subsuelo con L_v de aproximadamente $0.5 \cdot 10^4$ m m^{-3}. Es probable que el valor adaptativo de una alta L_v esté relacionado con la extracción de nutrientes inmóviles como P, y no con la absorción de agua.

Una vez que el agua penetra en la superficie de la raíz, debe superar una resistencia radial significativa antes de llegar al xilema. Esta resistencia se debe a la suberización de una capa, la endodermis, que evita que el agua fluya a través del apoplasto, forzando por tanto el flujo de agua a través de las membranas célulares. La bica-

pa lipídica de las membranas celulares ejerce una resistencia significativa al flujo de agua en las raíces. Sin embargo, las membranas contienen un tipo particular de proteínas, llamadas acuaporinas. En efecto, las acuaporinas pueden controlar el flujo de agua a través de las membranas mediante cambios en su abundancia, abriendo y cerrando el canal (gating), o mediante ambos mecanismos; para estas propiedades se puede establecer una analogía entre las acuaporinas y los estomas. En algunos casos hay una buena correlación entre la expresión de las acuaporinas y los rasgos fisiológicos. Por ejemplo, la expresión de las acuaporinas sigue un ciclo de día/noche de acuerdo con los cambios diarios de conductividad hidráulica de la raíz, asociada al ciclo de transpiración. Una vez alcanzado el xilema, las resistencias axiales desde la raíz hasta la base del tallo y desde ésta a las hojas son más pequeñas (Fig. 14.2).

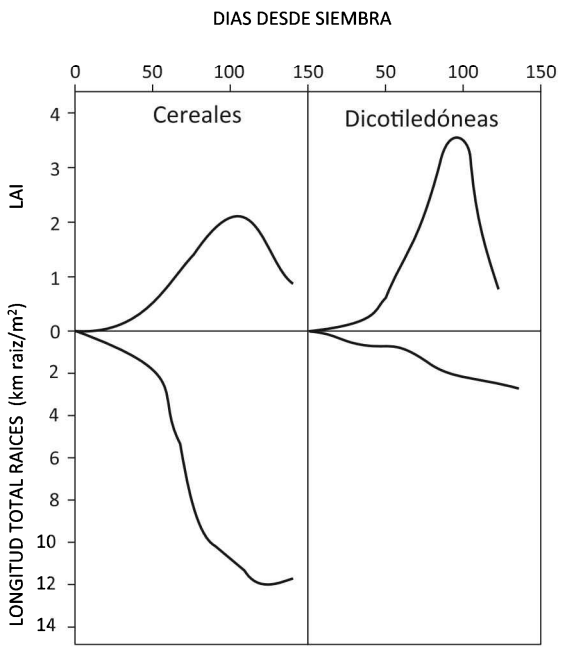


Figura 14.3. Los cereales (p.ej. trigo) tienen una densidad de longitud de raíces mucho mayor que las dicotiledóneas (p.ej. altramuz) en cultivos de índice de área foliar similar. Adaptado de Hamblin y Tennant (1987) Aust J Agric Res 38:513-527

El agua en las hojas encuentra dos resistencias en paralelo: la resistencia estomática, de magnitud variable en función de la apertura de los estomas y la resistencia cuticular, mucho mayor que la resistencia estomática, pero muy variable entre especies, como en el caso del arroz que tiene la mitad de resistencia cuticular que el maíz o el sorgo.

A pesar de que el cultivo es un intermediario para el transporte de agua entre el suelo y la atmósfera, la modulación de las resistencias descritas anteriormente per-

miten el ajuste, dentro de ciertos límites, del suministro de agua del suelo a la demanda evaporativa de la atmósfera.

14.4. EFECTOS DEL DÉFICIT HÍDRICO

El estrés hídrico puede afectar a prácticamente todos los procesos morfológicos y fisiológicos del cultivo si su duración y severidad son lo suficientemente amplios. La respuesta general se refleja en una reducción del tamaño de la planta, de su área foliar y del rendimiento cosechable.

Los principales efectos del estrés hídrico en los cultivos pueden explicarse en gran parte por el efecto sobre dos procesos, el crecimiento expansivo y el funcionamiento de los estomas.

14.4.1. Crecimiento expansivo

La turgencia es responsable de la forma de la planta y es un requisito necesario para la expansión celular, ya que el incremento en tamaño requiere tanto de nueva síntesis de pared celular como de presión de turgencia sobre la pared. La tasa relativa de expansión celular se puede relacionar con Ψ_p por la siguiente ecuación:

$$\frac{dV}{dt}\frac{1}{V} = \varepsilon\,(\Psi_p - \Psi_{pu}) \tag{14.3}$$

donde V es el volumen de la célula, ε es la extensibilidad de la pared celular y Ψ_{pu} es el potencial de turgencia umbral, por debajo del cual se detiene la expansión. El valor de Ψ_{pu} es alto, lo que significa que con una pequeña reducción en Ψ_p la expansión puede detenerse, y esto puede ocurrir mucho antes de que se produzca marchitez ($\Psi_p = 0$).

En general, si el cultivo se somete a un déficit de agua progresivo, se produce aclimatación por el aumento de ε y/o la reducción de Ψ_{pu} , lo que condiciona las respuestas futuras de las plantas al déficit hídrico. Estas aclimataciones se producen de forma diferencial para la expansión de las raíces y de los órganos aéreos, de modo que el crecimiento de la parte aérea es mucho más sensible al estrés hídrico que el crecimiento de las raíces. En las raíces Ψ_{pu} se reduce rápidamente y los solutos se acumulan de manera que se reduce Ψ_o (ajuste osmótico), lo que permite que el crecimiento de raíces continúe con un bajo potencial de agua del suelo.

La gran sensibilidad del crecimiento expansivo al déficit de agua conduce a reducciones de expansión para todos los órganos que están dentro de su fase de crecimiento cuando se produce el déficit de agua, lo que provoca efectos a nivel de cultivo en función del momento de ocurrencia del déficit.

14.4.2. Funcionamiento de los estomas

En términos evolutivos, el cierre de los estomas sirve para evitar la deshidratación y muerte de la planta sometida al ambiente aéreo, en especial cuando el agua es escasa. Las contrapartidas del cierre de los estomas son la reducción de la entrada de CO_2 a las hojas y por lo tanto de la asimilación, y el aumento de la temperatura de la cubierta. El cierre de los estomas en respuesta a un alto déficit de presión de vapor o suelo seco favorece un mayor cociente fotosíntesis/transpiración que está relacionado con la eficiencia en el uso del agua como veremos más adelante (sección 14.5).

Los estomas están formados por dos células guarda con forma de riñón que se sueldan en sus extremos. La apertura del estoma se produce cuando las células guarda se encuentran turgentes. Si su turgencia se reduce las células guarda se aproximan y el estoma se cierra. Por lo tanto, la resistencia de los estomas es una función del potencial de presión de las células guarda que está regulado por el potencial hídrico de la hoja y por otros factores de una manera bastante compleja. La complejidad en el comportamiento de los estomas surge de varias causas. En primer lugar, los estomas son sensibles a muchos factores del ambiente (concentración de CO_2, temperatura, déficit de presión de vapor, radiación, calidad de la luz) y de la propia planta (p.ej., la edad de la hoja, la relación fuente:sumidero, véase el Capítulo 10). En segundo lugar, el proceso de regulación de la apertura estomática es muy dinámico; por ejemplo, la resistencia de los estomas aumenta cuando aumenta la demanda evaporativa, pero el aumento de la resistencia mejora la hidratación y por lo tanto el potencial hídrico de las hojas, que a su vez estimula la apertura de los estomas. En períodos de tiempo muy cortos (minutos) el tamaño del estoma cambia continuamente, y también hay variación entre los estomas en la misma hoja. En tercer lugar, hay diferencias genotípicas en la respuesta de los estomas a la sequedad del suelo o de la atmósfera. En algunas especies, como el maíz y la soja, los estomas tienden a cerrarse cuando el potencial hídrico de la hoja cae; esto permite el mantenimiento del potencial hídrico de las hojas y por esta razón esta estrategia ha sido llamada "isohídrica". En otros cultivos como el girasol, los estomas tienden a mantenerse abiertos aunque baje el potencial hídrico. Esta respuesta se llama "anisohídrica". Hay, sin embargo, variación intraespecífica en estas estrategias y una amplia gama de respuestas entre los comportamientos extremos isohídrico y anisohídrico (Fig. 14.4). En cuarto lugar, hay contrapartidas adaptativas. Para entender estas contrapartidas es necesario reconocer tres funciones de los estomas: regular la relación entre la fotosíntesis y la transpiración, evitar la cavitación, y regular la temperatura de la cubierta. El cierre de los estomas cuando el suelo se seca o con alta demanda evaporativa aumenta el cociente fotosíntesis/transpiración, y evita la cavitación. Sin embargo, el cierre de los estomas aumenta la temperatura de la cubierta. Esta contrapartida significa que la fisiología de los estomas no siempre puede ser optimizada. En el trigo, el algodón y la vid, cv. Shiraz, el estrés por alta temperatura favorece la apertura de los estomas y el enfriamiento por evaporación a expensas de un menor cociente fotosíntesis/transpiración, lo que sugiere que el mantenimiento de la temperatura del cultivo den-

tro de ciertos límites es, bajo ciertas condiciones, más importante que el ahorro de agua (Fig. 14.5). El papel de los estomas en la regulación de la temperatura del cultivo es de especial importancia en las regiones cálidas, donde las olas de calor, agravadas con sequía, pueden causar graves daños.

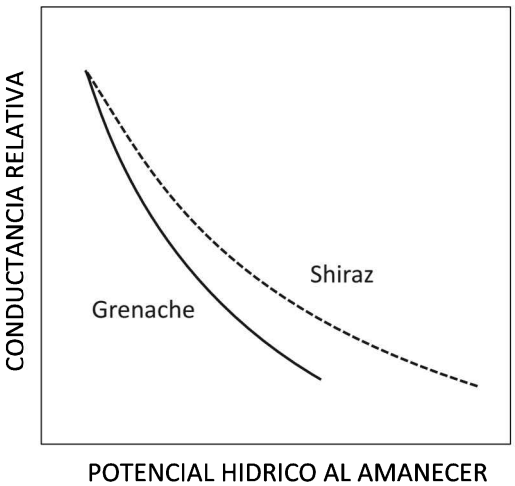


Figura 14.4. La conductancia estomática se reduce conforme aumenta el déficit hídrico, pero los estomas son más sensibles en Grenache (línea continua) que en Shiraz (línea de puntos). Adaptado de Schultz HR (2003) Plant Cell and Environ 26:1393-1405

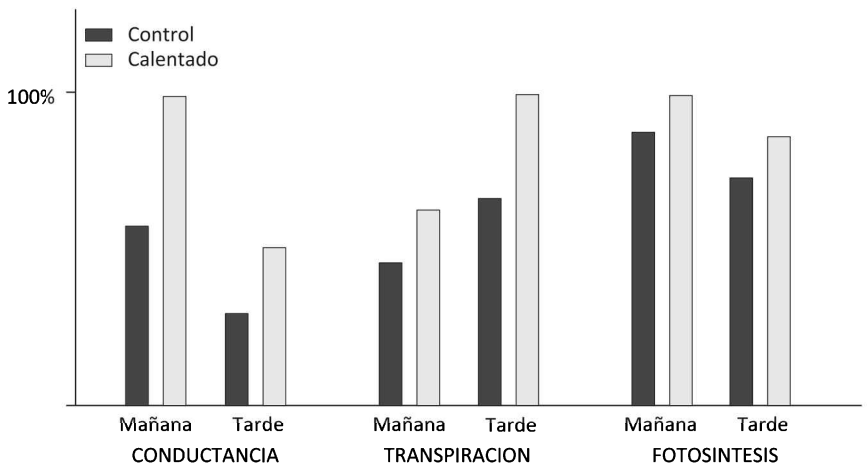


Figura 14.5. Comparación de la conductancia estomática, la transpiración y la fotosíntesis neta en vides cv. Shiraz bajo riego con temperatura ambiente (control) o temperatura elevada artificialmente. La temperatura elevada aumenta la conductancia estomática y la transpiración, y en un grado menor la fotosíntesis. El enfriamiento por evaporación mantiene la diferencia de temperatura de la cubierta por debajo de 1ºC entre vides con calefacción y vides del control, a expensas de un menor cociente fotosíntesis/transpiración. Adaptado de Soar et al. (2009) Functional Plant Biol 36:801-814

14.4.3. La regulación de la transpiración de los cultivos

La transpiración del cultivo (E_p) puede ser analizada como el producto de tres factores: área total que transpira, que se puede aproximar por el índice de área foliar (LAI), radiación interceptada por unidad de índice de área foliar y transpiración por unidad de radiación interceptada:

$$E_p = LAI \cdot IR/LAI \cdot E_p/IR \qquad (14.4)$$

Un cultivo de pequeño tamaño es el medio más eficaz de control de la transpiración. De hecho, los componentes del LAI como el número de hijos o ramas, y el área de las hojas individuales son muy sensibles al déficit hídrico. Para un determinado LAI, la cantidad de radiación interceptada, que proporciona la energía para la evaporación del agua, depende de la arquitectura del cultivo. La Figura 13.6 (Capítulo 13) muestra cómo el marchitamiento puede reducir transitoriamente la relación IR/LAI y por lo tanto reducir la transpiración. La transpiración por unidad de radiación interceptada está relacionada con la conductancia de las cubiertas vegetales, que se relaciona tanto con sus propiedades aerodinámicas como con la conductancia estomática (Recuadro 14.1).

La importancia relativa de los factores de la ecuación 14.4 cambia con el desarrollo del cultivo (Tabla 14.1). En general, la expansión de los órganos es mucho más sensible al déficit hídrico que la conductancia estomática y la regulación a través del LAI es el principal control de la transpiración. La Figura 14.6 ilustra esta idea con datos experimentales de girasol en Córdoba en 1991. En verano, la tasa de expansión disminuye cuando el contenido relativo de agua del suelo es de 0.8, mientras que la conductancia estomática se ve afectada cuando el agua del suelo relativa es 0.2-0.3. En la primavera la expansión se reduce después de que la mitad del agua

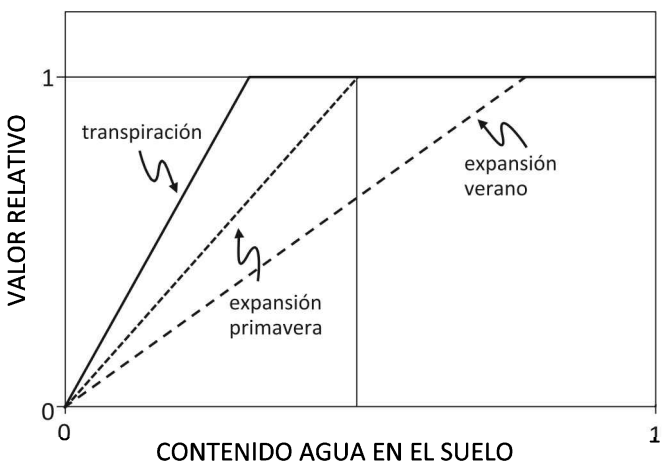


Figura 14.6. Relaciones entre crecimiento expansivo o transpiración y el contenido de agua del suelo para girasol en primavera y verano. El contenido de agua del suelo se expresa como relativo a los valores extremos de Punto de Marchitez (0) y Capacidad de Campo (1). Adaptado de Sadras et al. (1993) Agron J: 85:564-570).

en el suelo se haya agotado, lo que se explica por el mejor estado hídrico de las plantas bajo una menor demanda evaporativa. Así, durante el período de expansión del cultivo, la reducción del LAI es el control principal de la transpiración. Sin embargo, en cultivos anuales que alcanzan su máximo LAI alrededor de la floración, cuando el número y el tamaño de las hojas individuales ya se ha fijado, la expansión deja de ser relevante durante el llenado del grano. En esta etapa, la senescencia de las hojas es la única regulación posible del LAI, y, a menudo el déficit hídrico acelera este proceso (Tabla 14.1).

Tabla 14.1. Importancia relativa evaluada desde muy alta (+++) hasta despreciable (-) de los mecanismos que regulan la transpiración del girasol antes y después de la antesis.

Proceso	Mecanismo	resultado	pre-antesis	después de la antesis
↓ radiación interceptada	↓ tasa de crecimiento de las hojas	↓ LAI	+++	-
↓ radiación interceptada	↑ senescencia de las hojas		+	++
↓ radiación interceptada	↓ coeficiente de extinción (marchitamiento)	↓ IR/LAI	+	++
↓ transpiración por ud de rad. interceptada	↓ conductancia estomática	↓ E_p/IR	-	++

Recuadro 14.1. Acoplamiento de los cultivos y la atmósfera

La Figura 14.2 ilustra el flujo de agua desde el suelo a la atmósfera al nivel de la planta. A nivel del cultivo, sin embargo, hay una resistencia adicional entre la cubierta y la atmósfera, que a menudo se denomina resistencia aerodinámica. Conforme aumenta la resistencia aerodinámica, la cubierta y la atmósfera se desconectan cada vez más. En estos casos, el impacto de la resistencia estomática en el control de la transpiración del cultivo es menor que en los casos en que el componente aerodinámico presenta una resistencia menor. Para vegetación alta, aerodinámicamente rugosa, como los bosques de coníferas, la resistencia aerodinámica es pequeña, la cubierta y la atmósfera están estrechamente acoplados, y la regulación estomática tiene un impacto significativo en la transpiración. Por el contrario, en vegetación baja y aerodinámicamente más lisa, como los pastizales, la resistencia aerodinámica es mayor, la cubierta y la atmósfera se encuentran menos acopladas, y la regulación estomática tiene un menor impacto en la regulación de la transpiración.

14.4.4. Efectos sobre otros procesos e interacciones

Los efectos de la falta de agua dependen del momento de ocurrencia, de su duración y de su intensidad. Un déficit severo afecta a casi todos los procesos del culti-

vo, y puede conducir a la pérdida total de la cosecha. Los cultivos por lo general no sufren déficits tan graves como para afectar a su supervivencia, por lo que sólo tendremos en cuenta los efectos de leves a moderados del déficit de agua. Los efectos pueden ser definidos e investigados en diferentes niveles de organización. Por ejemplo, el déficit de agua puede reducir las tasas de división y expansión celular, e inducir procesos de diferenciación celular anormales, lo que puede resultar en aborto de flores y/o una reducción en el número de primordios florales. El estrés hídrico puede causar hidrólisis de proteínas y la acumulación de aminoácidos que, a nivel de la hoja, reduce la fijación de CO_2 por un efecto directo del estrés sobre los fotosistemas. El déficit de agua aumenta los niveles de ácido abscísico y etileno y reduce los niveles de ácido indolacético, citoquininas y giberelinas. Estos cambios hormonales pueden conducir a la senescencia acelerada. El estrés hídrico tiene poco efecto sobre los procesos respiratorios, el transporte de asimilados y la tasa de desarrollo.

El estrés hídrico en situaciones reales de campo, sin embargo, no ocurre como un hecho aislado. En ambientes áridos y semiáridos, la baja fertilidad del suelo interactúa con la escasez de precipitaciones para llevar a una co-limitación de agua y nutrientes. La co-limitación por agua y nitrógeno es particularmente importante para el rendimiento de los cereales en ambientes mediterráneos. En estos entornos, el estrés de agua también se combina con el estrés por calor. En los cultivos de trigo en el sudeste de Australia, el daño a espigas causado por un episodio de calor cerca de la floración fue significativo para los cultivos de secano, pero no para los cultivos de regadío (Tabla 14.2). Las condiciones que favorecen el crecimiento más vigoroso y un agotamiento más rápido del agua del suelo, incluyendo el suministro excesivo de nitrógeno y una mayor densidad de siembra, agravan los efectos del calor en los cultivos de secano (Tabla 14.2). La sensibilidad de los cultivos a los insectos y enfermedades puede aumentar, disminuir o permanecer sin cambios en las plantas que sufren estrés hídrico. Por ejemplo se ha observado que el algodón con déficit hídrico es menos susceptible a los ácaros que el algodón bien regado. En este caso el déficit de agua aumentó el grosor de la hoja y su dureza, lo que las hace menos agradables al paladar para los ácaros. En pruebas de elección, los ácaros mostraron una marcada preferencia por las hojas de las plantas bien regadas. Por el contrario, las enfermedades de la raíz pueden agravar el efecto del déficit hídrico.

Tabla 14.2. Daños en la espiga (%) causados por el estrés por calor en cultivos de trigo de secano bajo dos densidades de siembra y varias dosis de nitrógeno. No se observó ningún daño en la espiga cuando los mismos tratamientos se aplicaron bajo riego. Adaptado de Rodriguez et al. 2005. Aust. J. Agric. Res. 56:983-993.

Dosis de N	Densidad 50%	Densidad normal
Ninguna	10	22
Baja	23	32
Alta	33	60

14.5. EL ACOPLAMIENTO DE LA FOTOSÍNTESIS Y LA TRANSPIRACIÓN

El flujo de CO_2 hacia el interior de la hoja sigue el mismo camino que el flujo de vapor de agua hacia fuera de la hoja (transpiración). Cualquier apertura o cierre de los estomas afecta a los dos procesos.

El flujo de la transpiración (E_p, mol m^{-2} s^{-1}) puede expresarse como:

$$E_p = 1.6\, g_{sc} \frac{e_i - e_a}{P_{at}} \tag{14.5}$$

donde g_{sc} (mol m^{-2} s^{-1}) es la conductancia estomática para CO_2, e_i y e_a (kPa) son la presión de vapor en las cavidades subestomáticas y el aire fuera de la hoja, respectivamente, y P_{at} (kPa) es la presión atmosférica. El factor 1.6 es la relación de los coeficientes de difusión para el vapor de agua y el CO_2, respectivamente, en aire a 25ºC. Una ecuación similar (Ec. 13.1) se utiliza para la fotosíntesis.

El aire dentro de las cavidades subestomáticas se encuentra por lo general cerca de la saturación ($e_i = e_s$ para la temperatura de la hoja), por lo que sumando y restando e_s (calculada para la temperatura del aire), se puede escribir:

$$e_i - e_a = e_s\,(T_c) - e_a + e_s\,(T_a) - e_s\,(T_a) = VPD + \Delta\,(T_c - T_a)$$

donde VPD es el déficit de presión de vapor (Capítulo 5), T_c y T_a son la temperatura de la hoja (cultivo) y del aire, respectivamente, mientras que Δ (kPa K^{-1}) es la pendiente de la presión de vapor de saturación frente a la temperatura.

Por lo tanto la relación entre fotosíntesis neta y la transpiración será:

$$\frac{P_n}{E_p} = \frac{(C_a - C_i)\, P_{at}}{1.6\,[VPD + \Delta(T_c - T_a)]} \tag{14.6}$$

donde C_a y C_i son las concentraciones de CO_2 en la atmósfera y en la cavidad subestomática, respectivamente.

Varios autores han demostrado que la relación C_i/C_a tiende a valores relativamente constantes de 0.7-0.8 (plantas C3) y 0.3-0.4 (plantas C4). Suponiendo que la temperatura de la hoja y el aire son iguales:

$$\frac{P_n}{E_p} = \frac{C_a(1 - C_i/C_a)\, P_{at}}{1.6\, VPD} = \frac{\alpha_w}{VPD} \tag{14.7}$$

Esta ecuación implica que el cociente fotosíntesis/transpiración (también llamado Eficiencia en el Uso del Agua, WUE) depende principalmente del déficit de presión de vapor: la cantidad de carbono fijado por unidad de agua que se pierde disminuirá a medida que el ambiente sea más seco o más caliente. Esto se ilustra en la Figura 14.7 que muestra valores horarios de WUE de algodón en función del VPD en días de verano en Córdoba, España. Aquí la WUE se calculó como la relación entre

la fotosíntesis neta del cultivo y la ET. La ecuación 14.7 también indica que la WUE aumenta a medida que aumenta C_a.

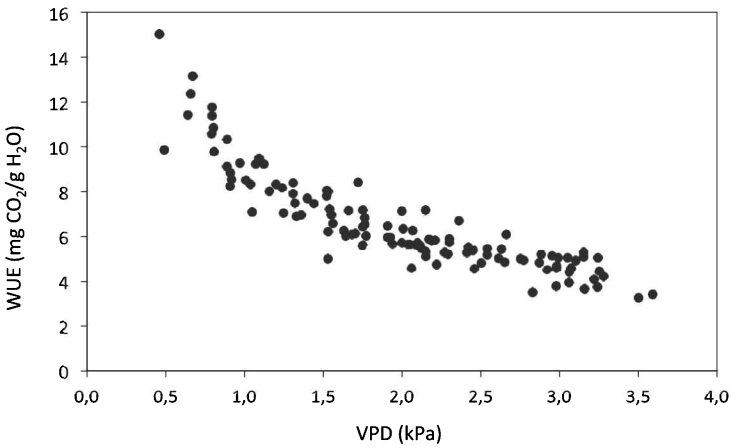


Figura 14.7. Relación entre Eficiencia en el Uso del Agua (WUE) y VPD para algodón en Córdoba (España) durante el verano de 2003. La WUE se calculó como el cociente entre fotosíntesis neta del cultivo y ET.

Para un valor actual de C_a = 397 µmol mol^{-1} el coeficiente α_w sería 5111-7667 µmol mol^{-1}kPa para las plantas C3 y 15334-17890 µmol mol^{-1}kPa para las plantas C4. Si convertimos estos valores para la producción de biomasa de carbohidratos y teniendo en cuenta la relación entre VPD durante el día y el VPD medio en periodos de 24 horas, los coeficientes serían 5.2-7.7 g de materia seca L^{-1} kPa para C3 y 15.5-18.09 g de materia seca L^{-1} kPa para C4. Si tenemos en cuenta además la respiración nocturna, los coeficientes se reducirían a alrededor del 60% de los valores previos para las estimaciones estacionales.

Por lo tanto, la acumulación de biomasa (g m^{-2} day^{-1}) se puede calcular como:

$$\Delta B = E_p \frac{\alpha_w}{VPD} \tag{14.8}$$

La misma ecuación se aplica a los árboles o plantas aislados, pero entonces la transpiración se expresa en L/árbol/día y el aumento de la biomasa en g/árbol/día.

Ejemplo 14.1.

Los valores típicos estacionales de WUE (g materia seca/kg de agua transpirada) para diversas especies C3 en el sur de España son: olivo (3.4), girasol (3.5) y trigo (5.3).

El valor más alto de trigo se debe, en principio, al bajo VPD durante su ciclo de diciembre a mayo (media 0.7 kPa), en comparación con el girasol (febrero a julio, 1.3 kPa) y olivar (de enero a diciembre de 1.2 kPa). Las estimaciones teóricas, tomando C_i/C_a=0.75, serían las siguientes:

Trigo: 6.5 g materia seca L^{-1} kPa /0.7 · 0.6 = 5.6 g materia seca / kg agua

Olivo: 6.5 g materia seca L^{-1} kPa /1.2 · 0.6= 3.25 g materia seca / kg agua

Girasol: 6.5 g materia seca L^{-1} kPa /1.3 · 0.6 = 3.0 g materia seca / kg agua

Ejemplo 14.1.

En el ejemplo 9.5, se calculó la transpiración de un olivo con un radio de 0.5 m en Córdoba, España el 21 de marzo con ET_0= 3 mm/día. La E_p calculada es de 2.07 L/día.

Si el VPD promedio es 1.5 kPa el aumento de la biomasa sería:

$$\Delta B = E_p \frac{\alpha_w}{VPD} = 2.07 \frac{L}{árbol\ día} \frac{6.5 \frac{g\ kPa}{L}}{1.5\ kPa} = 9 \frac{g}{árbol\ día}$$

14.6. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL DÉFICIT HÍDRICO EN LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA

El impacto del déficit de agua en la producción agrícola puede cuantificarse utilizando modelos de diferente complejidad. Aquí se ilustra el modelo simple de Stewart, y el modelo AquaCrop más complejo.

14.6.1. El modelo de Stewart

El modelo se basa en las relaciones empíricas encontradas entre la evapotranspiración del cultivo y el rendimiento que son el resultado de la asociación entre la transpiración y la fotosíntesis. Estos dos procesos se relacionan por dos razones. En primer lugar y más importante, ambos procesos son alimentados por la radiación que proporciona la energía para la evaporación del agua y para la reducción de CO_2. Los cultivos pequeños captan menos radiación, fijan menos carbono y transpiran menos. En segundo lugar, los flujos de agua y de CO_2 entre el cultivo y la atmósfera están parcialmente regulados por los estomas. Estos dos mecanismos explican las correlaciones entre la biomasa y la transpiración. Por lo tanto, si se conoce el índice de cosecha (HI), el rendimiento podría calcularse como una función de la transpiración estacional:

$$Y = HI \sum_{t=emergencia}^{t=cosecha} WUE\ E_p \tag{14.9}$$

donde la WUE es la biomasa producida por unidad de transpiración (g materia seca/ kg de agua), que depende principalmente del VPD y de la especie (véase 14.5). Por

simplicidad asumiremos que WUE es constante durante toda la temporada y que HI no se ve afectado por el déficit hídrico, pero véase la sección 13.10 para una discusión más realista. Como la evapotranspiración es la suma de la evaporación desde el suelo y la transpiración:

$$Y = HI \;\; WUE \left(\sum_{t=emergencia}^{t=cosecha} ET - \sum_{t=emergencia}^{t=cosecha} E_s \right)$$

(14.10)

Llegamos a una relación lineal entre el rendimiento y la evapotranspiración total. La ordenada en el origen es negativa, y la intersección de esta recta con el eje x es una aproximación a la evaporación del suelo mientras que la pendiente es el producto de HI y WUE.

Estamos interesados en el cálculo del rendimiento en función del agua utilizada (ET). Un enfoque simple que requiere una estimación a priori de la ET y del rendimiento del cultivo en ausencia de déficit (ET_x y Y_x) es el modelo de Stewart que calcula la reducción relativa en el rendimiento como una función lineal de la reducción relativa de la ET:

$$1 - \frac{Y}{Y_x} = K_y \left(1 - \frac{ET}{ET_x}\right)$$

(14.11)

donde K_y es un coeficiente de sensibilidad al estrés hídrico. Si HI no se ve afectado por el estrés hídrico y consideramos que ET es variable mientras que se mantiene constante la evaporación desde el suelo, entonces K_y dependerá sólo de la relación evaporación desde el suelo/transpiración:

$$K_y = 1 + \frac{E_s}{E_p}$$

(14.12)

Por otra parte, si la evaporación desde el suelo es proporcional a la ET, K_y debe tender a 1. Estas relaciones no son válidas para estrés hídrico severo que reduce HI. (ver 13.10). En general, los valores encontrados para K_y están en el intervalo 0.8-1.5.

El modelo de Stewart que fue adoptado por el Manual 33 de Riegos y Drenajes de la FAO de Doorenbos y Kassam, se ha utilizado como una primera aproximación para calcular el rendimiento en función de la ET, pero tiene una serie de limitaciones:

- Variación de la WUE: para un ambiente dado la WUE real dependerá de cuando se produce la transpiración real debido a la dependencia inversa de la WUE con el déficit de presión de vapor. Bajo estrés hídrico el patrón de uso del agua va a cambiar en comparación con la situación sin déficit que pueden dar lugar a cambios importantes en WUE.

- Cálculo del rendimiento máximo: en ausencia de datos locales fiables, una buena alternativa sería el uso de un modelo de simulación de cultivos, calibrado y verificado para las condiciones locales.
- Método de riego: el método de riego afecta a la evaporación desde la superficie del suelo. Obviamente con diferentes valores de E_s se alcanzan distintos valores de ET para una misma transpiración (variable que está directamente relacionada con la biomasa y el rendimiento). El coeficiente K_y de la ecuación 14.6 sólo puede ser considerado como independiente si E_s y E_p resultan igualmente afectados por una reducción en el suministro de riego, lo cual es muy poco probable.
- Aclimatación: las respuestas al estrés hídrico están condicionadas por la historia anterior de déficit. Además, en las plantas perennes el déficit hídrico durante una campaña puede seguir teniendo efectos durante la estación siguiente.

Estas limitaciones son comunes a cualquier modelo empírico utilizado para generar funciones de producción. Sin embargo, su uso puede ser ventajoso en aquellos casos en los que no se requiere una gran precisión, y en muchos casos estos modelos empíricos son la única alternativa disponible para fines prácticos.

14.6.2. El modelo de simulación AquaCrop

AquaCrop (www.fao.org/nr/water/aquacrop.html) es un modelo de simulación que predice el rendimiento en función del suministro de agua. Se basa en la relación entre B y E_p y en la constancia de la WUE (para una especie dada) si se normaliza por la demanda (ET de referencia). Después de la emergencia de las plántulas, el modelo calcula la tasa de expansión del dosel, y los componentes E_p y E_s de la ET para el cálculo de la extracción de agua del suelo con paso diario. Sobre la base de la cantidad de transpiración, el modelo calcula el incremento de B que se acumula hasta la cosecha. A medida que el dosel se desarrolla y el cultivo crece impulsado por tiempo térmico, se producen las diferentes etapas del desarrollo y, dependiendo del cultivo, el índice de cosecha se construye durante el período pertinente y se calcula el rendimiento en la fecha de cosecha.

El estrés hídrico afecta a los cálculos a través primero de reducciones en la expansión del dosel, seguido por la reducción de la conductancia estomática y por la aceleración de la senescencia foliar. Para cada proceso se definen diferentes umbrales específicos para cada cultivo en el contenido de agua de la zona radical, y el HI también es modulado por la falta de agua, disminuyendo generalmente bajo estrés severo. El modelo da una estimación del rendimiento potencial limitado por agua sin otros factores que limitan o reducen el rendimiento. Tiene un módulo de fertilidad del suelo para realizar ajustes en condiciones de fertilidad no óptimas que son comunes en muchos sistemas agrícolas.

Para obtener predicciones precisas, AquaCrop debe ser calibrado y validado con datos experimentales en el entorno donde se utilizará. Su descripción, junto con sus numerosas aplicaciones se pueden encontrar en el manual FAO 66.

BIBLIOGRAFÍA

Fereres E, Orgaz F, Gonzalez-Dugo V, Testi L, Villalobos FJ (2014) Balancing crop yield and water productivity tradeoffs in herbaceous and woody crops. *Functional Plant Biology* **41**, 1009-1018.

Gonzalez-Dugo V, Durand J-L, Gastal F (2011) Water Deficit and Nitrogen Nutrition of Crops. *Sustainable Agriculture* **2**, 557-575.

Sadras VO, Richards RA (2014) Improvement of crop yield in dry environments: benchmarks, levels of organization and the role of nitrogen. Journal of Experimental Botany 65, 1981-95.

Tanner, CB, Sinclair, TR, 1983. Efficient water use in crop production: research or re-search. In: Taylor, HM, et al. (Eds.), Limitations to Efficient Water Use in Crop Production. ASA, Madison, WI, pp 1–27.

Capítulo 15

Las limitaciones a la productividad de los cultivos

V.O. SADRAS
F.J. VILLALOBOS
E. FERERES

RESUMEN:

Los factores ambientales como el estrés hídrico, la deficiencia de nutrientes, las altas o bajas temperaturas, de naturaleza química (toxicidad de Al, salinidad) y las limitaciones físicas del suelo (por ejemplo, compactación), y los factores bióticos reducen el rendimiento del cultivo. El déficit de agua y de nitrógeno, y las limitaciones de los suelos generalmente tienen un mayor impacto en el tamaño del cultivo y la duración del ciclo, por lo que las reducciones de crecimiento están estrechamente vinculadas con la reducción de la radiación interceptada; la eficiencia en el uso de la radiación generalmente es menos sensible al estrés. Las temperaturas extremas en las etapas críticas suelen reducir el índice de cosecha y el rendimiento. Otros tipos de estrés pueden tener un efecto neutral, positivo o negativo para el índice de cosecha; esto depende en particular de la naturaleza, el momento de ocurrencia, la intensidad y la duración del estrés y su impacto relativo sobre la biomasa total y cosechable. Los rendimientos se reducen también por la acción de los agentes bióticos tales como plagas, enfermedades y malas hierbas. Las pérdidas potenciales de rendimiento debidas a estreses bióticos pueden ser muy altas, pero se disminuyen mediante las prácticas de protección de cultivos.

15.1. INTRODUCCIÓN

En el Capítulo 13 hemos analizado el rendimiento del cultivo como una función de la temperatura y la interceptación de radiación. Este rendimiento "potencial" será mayor que los rendimientos reales ya que otros factores bióticos y abióticos entran en juego. Los principales factores abióticos que reducen el rendimiento de los cultivos son el estrés hídrico (ya analizado en el Capítulo 14), el déficit de nutrientes, las condiciones químicas adversas (salinidad, acidez), el exceso de agua y los fenómenos meteorológicos extremos (altas o bajas temperaturas, granizo, viento). Los factores bióticos son las malas hierbas, plagas y las enfermedades.

En este capítulo revisaremos los principales efectos de estos factores sobre la productividad de los cultivos. Algunos de ellos serán tratados con más detalle en capítulos específicos de este libro (salinidad, deficiencias nutricionales, heladas).

15.2. DÉFICIT DE NUTRIENTES Y OTRAS LIMITACIONES DE LA PRODUCTIVIDAD RELACIONADAS CON EL SUELO

El déficit de agua y el de nutrientes reducen la biomasa principalmente mediante la reducción del índice de área foliar y por tanto, de la interceptación de radiación; bajo estrés severo también se reduce la eficiencia en el uso de la radiación. Esto se debe a que el crecimiento expansivo es más sensible al déficit de agua o de nutrientes que la tasa fotosintética de las hojas. De hecho, una respuesta común a corto plazo del déficit de agua o nitrógeno es la acumulación de hidratos de carbono ya que la restricción en la expansión es más severa que la restricción en la fotosíntesis, lo que lleva a un exceso transitorio de carbono reducido.

Los efectos del suministro de nitrógeno sobre el crecimiento y el rendimiento del cultivo se pueden explicar en términos de sus efectos sobre la interceptación y la eficiencia en el uso de la radiación. El déficit de nitrógeno reduce el LAI mediante la reducción del ahijado, la ramificación y la expansión de las hojas (Fig. 15.1). El reducido tamaño de las hojas de los cultivos deficientes en nitrógeno se asocia con tasas reducidas de división y expansión celular (Tabla 15.1). El déficit de nitrógeno puede acelerar la senescencia de las hojas (Fig. 15.2), lo que contribuye a la reducción de la radiación interceptada y de la fotosíntesis. La Rubisco y las proteínas captadoras de luz implicadas en la fotosíntesis representan el 60% del contenido de N en las hojas, por lo tanto, la secuencia escasez de nitrógeno → menos Rubisco → menos fotosíntesis.

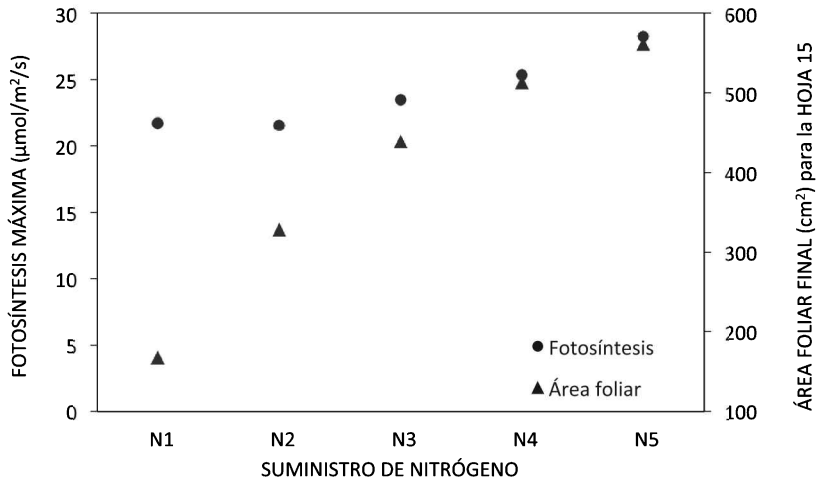


Figura 15.1. El déficit de nitrógeno reduce la fotosíntesis y el tamaño de la hoja. Se cultivaron plantas de girasol bajo cinco regímenes de nitrógeno, con tratamientos extremos que recibieron 0.25 (N1) y 7.5 g de N por planta (N5). Adaptado de Connor et al. (1993) Aust J Plant Physiol 20: 251-263

Tabla 15.1. El déficit de nitrógeno reduce el número de células y su tamaño, y por lo tanto, el área foliar de girasol. Se muestran datos de la hoja número 10 completamente expandida para alto o bajo N. Adaptado de Trapani et al. 1999. Ann. Bot. 84:599-606

	Número de células	Area por célula	Area foliar
	x 10^6	μm^2	cm^2
Alto N	56	554	302
Bajo N	33	443	147

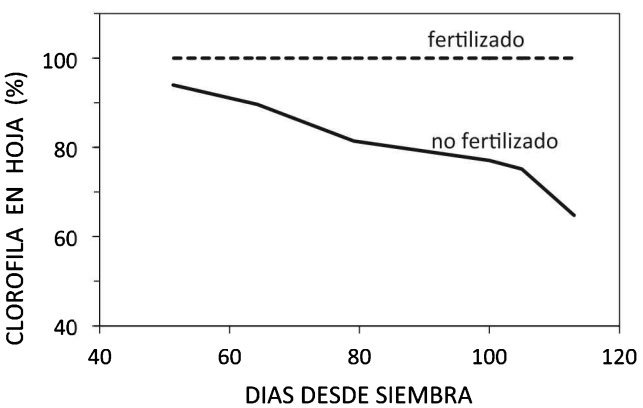


Figura 15.2. La deficiencia de nitrógeno acelera la senescencia de las hojas del trigo. La concentración de clorofila, medida en la hoja expandida más joven, se expresa como porcentaje de la de los cultivos bien fertilizados. Adaptado de Caviglia y Sadras (2001) Field Crops Res 69:259-266

Los efectos del suministro de agua en el crecimiento y rendimiento del cultivo (Capítulo 14) también se pueden explicar en términos de interceptación y eficiencia en el uso de la radiación. En respuesta al déficit de agua, las plantas tienen respuestas en gran medida irreversibles, como la reducción del ahijado o la ramificación, y la reducción de la expansión foliar. La reducción de la conductancia estomática y el marchitamiento son respuestas transitorias al déficit hídrico que reducen tanto el consumo de agua de los cultivos como la fotosíntesis. La Figura 15.3 ilustra el patrón de diente de sierra de la radiación interceptada por la alternancia de períodos con/sin déficit hídrico debido al marchitamiento y la recuperación transitoria después del riego. Además de los efectos individuales del nitrógeno y del agua, estos recursos a menudo interactúan de manera compleja. En distintos cultivos de trigo creciendo bajo una combinación de regímenes de riego y fertilizantes, la RUE fue de 1.8 g/MJ en secano para cultivos no fertilizados y aumentó a 2.1 g/MJ con la fertilización nitrogenada. La aplicación de un riego semanal no mejoró la RUE en los cultivos no fertilizados, pero el riego combinado con fertilización nitrogenada aumentó la eficiencia a 2.5 g/MJ.

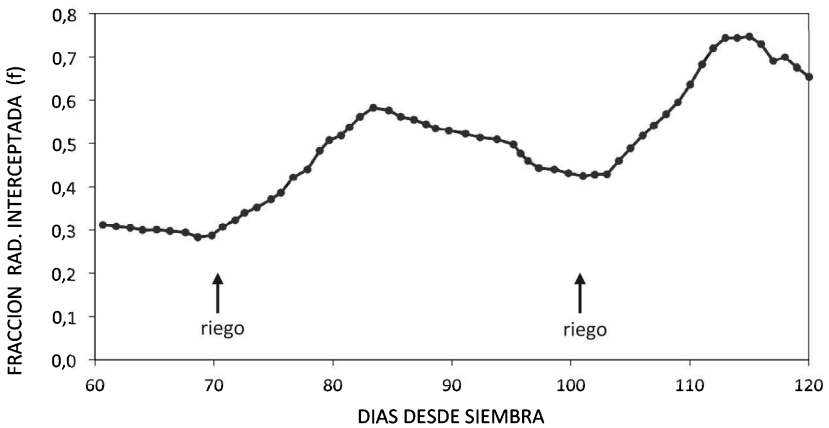


Figura 15.3. Variación de la fracción de radiación interceptada de un cultivo de cacahuete. El patrón de diente de sierra de la interceptación se debe al marchitamiento transitorio y la recuperación después del riego. Durante este período el LAI aumentó de 0.5 a 2. Las flechas muestran las fechas de riego. Adaptado de Matthews et al. (1988) Exp Agric 24:203-213

Al igual que para agua y suministro de nitrógeno, la reducción en el crecimiento del cultivo en respuesta a las limitaciones físicas y químicas del suelo está causada principalmente por la reducción del tamaño de las plantas y de la interceptación de la radiación, mientras que la eficiencia en el uso de la radiación es menos sensible al estrés. Esto se ilustra con dos ejemplos. La compactación del suelo es un problema común, a menudo causado por el laboreo, el tráfico de maquinaria, y la pérdida de materia orgánica, lo que se traduce en un aumento de la densidad aparente del suelo. Sus efectos sobre los cultivos son de dos tipos: se impide la emergencia y el establecimiento de las plántulas, se ralentiza el crecimiento del sistema radical y se deprime el crecimiento de la parte aérea. El efecto de la compactación en el crecimiento de la raíz se cuantifica por la resistencia a la penetración, que puede ser me-

dida con un penetrómetro. Para un suelo en particular, la resistencia a la penetración es directamente proporcional a la densidad aparente e inversamente proporcional al contenido de agua del suelo. Por lo tanto, los efectos de la compactación son más graves cuando el suelo está seco (Capítulo 17). En la región de Mallee del sudeste de Australia, los suelos arenosos a menudo desarrollan una capa compactada a 0.2-0.3 m de profundidad, lo que limita el crecimiento radical y la absorción de agua y de nitrógeno por debajo de esa profundidad. Los cultivos en suelo compactado se compararon con cultivos en los que se empleó subsolador para eliminar la restricción. El rendimiento de trigo en el suelo compactado varió de 1.2 a 2.9 t/ha, y el subsolado mejoró el rendimiento hasta un 40%. La reducción en el rendimiento asociado con la compactación se explicó en su totalidad por la reducción en el índice de área foliar y la radiación interceptada, mientras que la eficiencia en el uso de la radiación no se vió afectada por la condición del suelo. La toxicidad por aluminio reduce el rendimiento en suelos ácidos (pH <5.8), que representan aproximadamente el 30% de los suelos agrícolas en todo el mundo. El análisis del crecimiento de trigos tolerantes y sensibles a Al en el sur de Chile mostró una marcada reducción en la radiación interceptada conforme aumentó la concentración de Al en el suelo, una RUE en gran medida insensible en el trigo tolerante, y una reducción en RUE en el trigo sensible sólo a altas concentraciones de Al (Fig. 15.4).

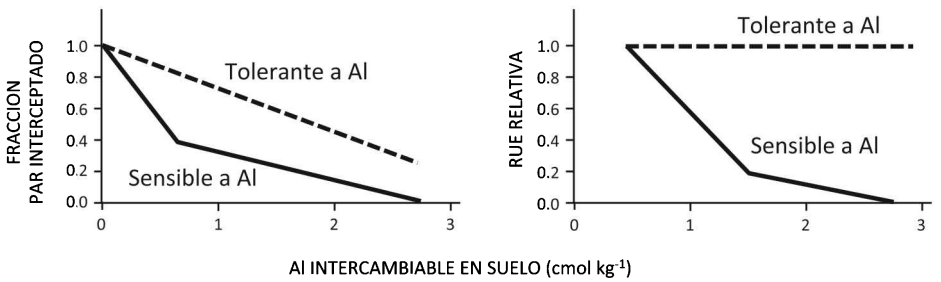


Figura 15.4. Efectos de la toxicidad del aluminio en el suelo sobre (a) interceptación de radiación y (b) eficiencia en el uso de la radiación de cultivos de trigo. Adaptado de Valle et al. (2009) Field Crops Res 114:343-350

15.3. ACCIDENTES CLIMÁTICOS

El efecto de las temperaturas extremadamente bajas se tratará en el Capítulo 29 y los efectos del viento en el Capítulo 28.

15.3.1. Temperaturas altas

En general, el efecto principal de una temperatura extremadamente alta es una reducción en HI debido a la reducción de la polinización o al aborto de las semillas. Por ejemplo, el número de granos de los cereales de invierno disminuye con temperaturas del ambiente por encima de 31ºC. Por otra parte, las altas temperaturas aceleran la senescencia de las hojas y acortan el período de llenado del grano.

En climas mediterráneos la baja disponibilidad de agua suele coincidir con altas temperaturas por lo que la baja transpiración debida al déficit amplifica el estrés por calor y la temperatura de la cubierta aumenta por encima de la temperatura del aire (ver 28.14).

15.3.2. El granizo

El granizo es una forma de precipitación sólida que consiste en bolas o trozos de hielo que se originan en nubes de tormenta (Cumulonimbus). Los granizos muestran típicamente diámetros entre 5 y 12 mm. La ocurrencia del granizo es localizada, con zonas afectadas de unas pocas hasta unos cientos de hectáreas.

La ocurrencia de granizo es más frecuente en las latitudes medias (en zonas del interior y regiones elevadas) que en los trópicos a pesar de la mayor frecuencia de tormentas eléctricas en estos últimos. Algunas zonas en las que el granizo es más común son el norte de la India y algunas regiones de China y Europa Central. Durante el año el granizo se produce sobre todo durante la primavera y el verano.

El daño al cultivo se debe al impacto de granizo, cuya velocidad será proporcional al tamaño. Para una piedra de granizo de 1 cm de diámetro, la velocidad máxima podría alcanzar los 9 m/s, mientras que un granizo de 8 cm caería a 48 m/s. Aparte del daño físico directo que destruye las hojas o las estructuras reproductivas, las heridas provocadas facilitan la infección por patógenos. El efecto de la defoliación causado por el granizo en el rendimiento del cultivo depende de la etapa de desarrollo en que se produce y el nivel de defoliación. Una defoliación temprana y parcial puede ser compensada por el aumento de la asignación de materia seca a las hojas remanentes lo que resulta en una pequeña reducción en el rendimiento. La defoliación completa antes de la antesis puede ser catastrófica para el rendimiento. El daño a las estructuras reproductivas conduce a una reducción del índice de cosecha en proporción al número de estructuras afectadas. El daño limitado a frutos reduce su valor comercial.

Los cultivos de alto valor pueden ser protegidos mediante mallas antigranizo. En los cultivos anuales y frutales extensivos las principales alternativas de protección son:

- cohetes antigranizo que utilizan yoduro de plata
- generadores de humo con yoduro de plata
- cañones antigranizo que lanzan ondas de choque hacia las nubes
- contratación de un seguro.

15.4. EL ENCHARCAMIENTO

El alto contenido de agua implica un suministro limitado de oxígeno para la respiración de las raíces, por lo que su funcionamiento (absorción, crecimiento) empeora.

Si el suelo está saturado las raíces se descomponen a partir de la punta, la planta deja de crecer y finalmente morirá. A menudo los cultivos se ven afectados por situaciones de encharcamiento temporal y se recuperan parcialmente después, aunque el sistema radical tendrá una baja capacidad de absorción de agua y nutrientes. El efecto resultante será la reducción del rendimiento.

El encharcamiento también contribuye a las pérdidas de N por desnitrificación (véase el Capítulo 24), que es la conversión de nitrato a compuestos volátiles de N. La baja absorción de N causará síntomas de deficiencia de N.

El encharcamiento se puede prevenir mediante la mejora del sistema de drenaje del campo o mediante la siembra sobre camas elevadas.

15.5. LOS FACTORES BIÓTICOS

Los agentes bióticos que causan daños a los cultivos (genéricamente conocidos como plagas) son las malas hierbas, las plagas animales (artrópodos, nematodos, gasterópodos, roedores, aves), y los organismos patógenos (hongos, bacterias y virus).

El efecto de las plagas y las enfermedades en el crecimiento del cultivo también puede ser analizado en términos de captura y eficiencia en el uso de la radiación, y del índice de cosecha (Ec. 13.7). Los insectos que se alimentan de las estructuras reproductivas, tales como gusanos de la cápsula del algodón, tienen un efecto primario sobre el índice de cosecha. En casos extremos de infestación no controlada, por ejemplo, los cultivos de algodón pueden acumular grandes cantidades de biomasa con poco cuajado de los frutos, es decir, se reduce el índice de cosecha y el rendimiento. Los defoliadores reducen el área foliar y la radiación interceptada, mientras que algunas enfermedades también pueden reducir la tasa fotosintética de las hojas individuales y la RUE. Las arañas rojas por ejemplo, perforan la epidermis de las hojas con un aparato bucal en forma de aguja y se alimentan de las células del mesófilo en empalizada, lo que reduce la fotosíntesis de la hoja y la RUE (Fig. 15.5). Las

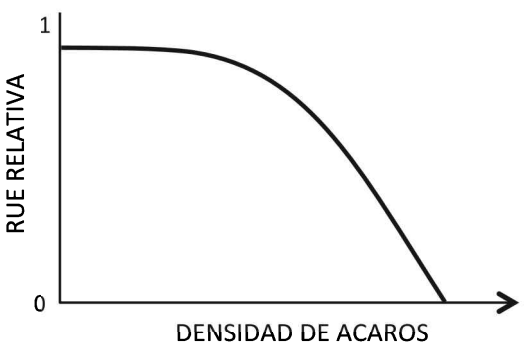


Figura 15.5. Las arañas rojas se alimentan de las hojas del mesófilo en empalizada del algodón, lo que reduce la fotosíntesis de la hoja y la eficiencia en el uso de radiación. Adaptado de Sadras y Wilson (1997) Crop Sci 37:481-491

comparaciones de los cultivos de trigo protegidos con fungicidas, y los cultivos no protegidos expuestos a daños por patógenos foliares mostraron que la reducción del crecimiento se asocia sobre todo con la reducción del área foliar sana, con una contribución secundaria de la reducción de la eficiencia en el uso de la radiación.

15.5.1. Los artrópodos

Muchas especies de insectos y otros artrópodos están presentes en el agroecosistema pero sólo unas pocas son plagas importantes, y pueden causar pérdida total de rendimiento. Los insectos son invertebrados de seis patas que por lo general sufren la metamorfosis durante el desarrollo. Los insectos adultos tienen un cuerpo con tres regiones (cabeza, tórax y abdomen), tres pares de patas, un par de antenas, piezas bucales complejas, y con frecuencia, dos pares de alas. La piel de un insecto es el exoesqueleto, que cubre todo el cuerpo.

Todos los insectos tienen fases de huevo y de adulto. La metamorfosis completa incluye 4 etapas (huevo, larva, pupa y adulto). Las plagas de insectos defoliadores más comunes son larvas de *Lepidoptera* (mariposas y polillas) y larvas y adultos de *Coleoptera* (escarabajos). Los áfidos, los cicadélidos y los trips no sólo se alimentan de los cultivos, sino que también son el principal vector de transmisión de enfermedades víricas en plantas.

Muchas especies de insectos son depredadores o parásitos de otros insectos y son, por lo tanto, beneficiosas.

15.5.2. Los patógenos de las plantas

Los patógenos de plantas (hongos, bacterias, virus, nematodos, etc.) afectan a las plantas del cultivo mediante la alteración de los siguientes procesos:

- Fotosíntesis: destrucción del tejido fotosintético, degradación de los cloroplastos, senescencia de las hojas, amarilleamiento, etc.
- Transporte de agua y nutrientes: destrucción de las raíces, formación de agallas radicales, alteración de la absorción radical, destrucción o bloqueo de los tejidos del xilema, daño a las cutículas de las hojas o a la función de los estomas (mayor transpiración), alteración del transporte del floema.
- La respiración aumenta después de la infección lo que contribuye a que se agoten las reservas de la planta.
- La permeabilidad de las membranas aumenta causando daños en las hojas por la pérdida de nutrientes y la entrada de toxinas.
- Hay cambios en la transcripción y la síntesis de ácidos nucleicos que alteran el funcionamiento y la estructura de la planta y la síntesis de enzimas o sustancias implicadas en la resistencia de la planta.

La enfermedad comienza con una infección primaria (la primera de la estación) debido al inóculo primario (esporas o micelio del hongo) que ha sobrevivido al invierno. Hibernación es la capacidad de un patógeno para sobrevivir desde una estación de crecimiento hasta la siguiente.

La probabilidad de una epidemia de la enfermedad es proporcional a la cantidad de inóculo y a la proximidad a su huésped. La infección primaria se produce cuando el patógeno está en contacto con un huésped susceptible en las condiciones adecuadas. Los patógenos entran directamente a través de la superficie de la planta o a través de heridas o aberturas naturales. Las bacterias y hongos patógenos por lo general requieren de agua libre para la germinación de las esporas, por lo que la infección se ve favorecida por los períodos húmedos con elevada humedad del aire y por los doseles mojados.

La difusión del patógeno a partir de una fuente de inóculo hasta el huésped se puede producir por el viento, las salpicaduras de lluvia, la escorrentía, los insectos, las semillas o plántulas infectadas, etc. Los hongos crecen y se expanden dentro de su huésped por medio de micelio, y eventualmente producen esporas sobre o dentro del tejido infectado. Estas esporas dan lugar a infecciones secundarias durante la temporada. Las bacterias se propagan en la planta por el rápido aumento de su población. Más tarde se generan fisuras en el tejido infectado, por lo que las células (inóculo secundario) quedan expuestas al exterior y, por tanto, se pueden dispersar.

El ciclo de infección secundaria puede repetirse muchas veces durante la estación de crecimiento, según la biología del patógeno y de su huésped y las condiciones ambientales.

15.5.3. Las pérdidas de rendimiento debidas a factores bióticos

Se pueden diferenciar dos niveles de pérdida de rendimiento. La pérdida potencial de rendimiento caracteriza el riesgo que el agente biótico ejerce sobre el rendimiento del cultivo en un escenario de no-control. Las pérdidas reales son las que se producen a pesar de las prácticas de protección de cultivos. La eficacia de las prácticas de protección de cultivos puede ser evaluada como un porcentaje de las pérdidas potenciales que ha sido impedido. La pérdida potencial y real son muy variables en función de la especie y la región considerada. La pérdida potencial por todos los factores bióticos en todo el mundo varía entre 50% (trigo) y más de 80% (algodón). Las pérdidas reales se estiman en 26-31% para la soja, el trigo, el maíz y el algodón, y 37-40% para las patatas y arroz, respectivamente (Tabla 15.2). En general, las malas hierbas causan la mayor pérdida potencial (23-40%) mientras que las plagas y los patógenos tienen menos impacto potencial (9-37% y 9-29%, respectivamente). Aunque los virus causan serios problemas en patata y remolacha azucarera en algunas zonas, las pérdidas en todo el mundo debidas a los virus son en promedio de 6-7% para estos cultivos y <1-3% en otros cultivos. La eficacia de la protección de cultivos se encuentra entre 0.43 y 0.65 para los diferentes cultivos. La

eficacia global en el control de malas hierbas (0.67-0.80) es mucho mayor que la de las plagas (0.09-0.67) o enfermedades (0.09-0.3). Estos valores tienen que ser tomados sólo como indicativos ya que se basan en estimaciones de rendimientos de referencia, no afectados por las plagas.

Tabla 15.2. Pérdidas de rendimiento debidas a agentes bióticos a escala global. Las pérdidas potenciales y reales de rendimiento son aquellas que ocurren en un escenario de no-control y un escenario de control normal, respectivamente. La eficacia de control es la fracción de las pérdidas impedido por las medidas de control actuales.
Adaptado de Oerke CE (2006)

		Trigo	Arroz	Maíz	Patata	Soja	Algodón
Malas hierbas	Potencial	23	37.1	40.3	30.2	37	35.9
	Real	7.7	10.2	10.5	8.3	7.5	8.6
	Eficacia	0.67	0.73	0.74	0.73	0.80	0.76
Plagas	Potencial	8.7	24.7	15.9	15.3	10.7	36.8
	Real	7.9	15.1	9.6	10.9	8.8	12.3
	Eficacia	0.09	0.39	0.40	0.29	0.18	0.67
Patógenos y virus	Potencial	18.1	15.2	12.3	29.3	12.4	9.3
	Real	12.6	12.2	11.2	21.1	10.1	7.9
	Eficacia	0.30	0.20	0.09	0.28	0.19	0.15
Total	Potencial	49.8	77	68.5	74.9	60	82
	Real	28.2	37.4	31.2	40.3	26.3	28.8
	Eficacia	0.43	0.51	0.54	0.46	0.56	0.65

BIBLIOGRAFÍA

Denison RF (2012) Darwinian Agriculture: How Understanding Evolution Can Improve Agriculture. Princeton University Press, Princeton, NJ

Oerke EC (2006) Crop losses to pests. J Agric Sci 144(1):31-43

Capítulo 16

La siembra y la plantación

F.J. VILLALOBOS
F. ORGAZ
E. FERERES

RESUMEN:

El establecimiento de un cultivo con éxito depende de varios factores en el momento de la siembra (contenido de agua, estructura y temperatura del suelo, viabilidad de la semilla, presencia de plagas). Por lo tanto las decisiones relativas a la fecha y la profundidad de siembra, a la densidad de siembra y a la disposición espacial de las plantas y otras técnicas culturales (riego, fertilización, aplicación de plaguicidas) serán críticas. La fecha de siembra debe hacer coincidir el ciclo de crecimiento con las mejores condiciones ambientales posibles para el cultivo. Las siembras tempranas de primavera pueden mejorar la eficiencia en el uso del agua en las zonas de clima mediterráneo, pero aumentan el riesgo de ataques de los factores bióticos. La densidad de siembra es una función del peso de las semillas, de la densidad de siembra deseada, de la viabilidad de la semilla y de la fracción esperada de plantas emergidas. Los árboles y algunas especies anuales se siembran en viveros donde crecen durante algún tiempo hasta que se trasplantan al campo. El mejor momento para plantar árboles es el otoño cuando están inactivos y el riesgo de desecación es mínimo.

16.1. INTRODUCCIÓN

Al sembrar o plantar el agricultor tiene la intención de asegurar un buen establecimiento del cultivo y conseguir las condiciones adecuadas para el crecimiento, el desarrollo y la obtención de un rendimiento objetivo. Para muchos cultivos la fase de establecimiento (germinación, emergencia y crecimiento temprano de las plántulas) es la fase más crítica del ciclo. Para tener éxito, el agricultor debe tomar una serie de decisiones relacionadas con la cantidad de semilla que debe usar, el método de siembra y la distribución espacial de las semillas, la fecha de siembra, la aplicación de plaguicidas o la realización de tareas adicionales, como el riego.

16.2. EMERGENCIA DEL CULTIVO

Algún tiempo después de la siembra de las semillas, las plántulas emergerán del suelo. La duración de este período y su éxito, es decir, la fracción de las semillas que conducen a plántulas emergidas, dependen de varios factores:

- Viabilidad de las semillas: una semilla viable es aquella capaz de germinar en condiciones adecuadas. La viabilidad disminuye con el tiempo desde la recolección de las semillas, lo que se produce en paralelo a la pérdida de sustancias de reserva (p.ej. la oxidación de lípidos en las semillas de girasol). En algunas especies hay mecanismos que retrasan la germinación de las semillas, tales como la presencia de inhibidores de la germinación o capas impermeables. Para estos casos se puede mejorar la germinación por escarificación (abrasión mecánica o tratamiento químico con ácidos para mejorar la permeabilidad de las cubiertas) o mediante estratificación, que es el mantenimiento de las semillas entre capas de suelo húmedo y frío (1-5ºC).

- Contenido de agua del suelo: la germinación es un proceso que comienza con la absorción de agua por la semilla seca (imbibición). Si el suelo está seco o el contacto entre la semilla y las partículas del suelo no es estrecho, se dificulta el transporte de agua desde el suelo hasta la semilla, que no se hidrata y por lo tanto, la germinación no se produce. Después de la germinación, la radícula se expande, lo que contribuye a garantizar el suministro de agua a la plántula. El aumento de la profundidad de la radícula se produce con antelación al crecimiento del hipocotilo, de modo que, en el momento de la emergencia la profundidad de las raíces normalmente excede 10 cm.

- Temperatura: junto con la profundidad, la temperatura determinará la duración del periodo siembra-emergencia. Si este período es demasiado largo, la probabilidad de ataques por patógenos o insectos del suelo aumenta. La Tabla 16.1 muestra los valores medios de tiempo térmico desde la siembra hasta la emergencia y su temperatura base para una serie de cultivos anuales.

- La estructura del suelo: la presencia de una costra superficial o la compactación excesiva del suelo por encima de la semilla dificultan la emergencia ya que evi-

tan la expansión del hipocotilo, sobre todo si el suelo está seco (véase el Capítulo 17). Los efectos de la costra superficial se pueden mitigar en parte empleando una mayor cantidad de semilla o mojando el terreno mediante riego.

- Presencia de plagas o patógenos: durante la emergencia y el crecimiento inicial de las plántulas, los ataques de los insectos u hongos del suelo a menudo puede conducir a un fallo del establecimiento del cultivo. Para evitar este problema se pueden aplicar fungicidas (tratamiento de semillas) y/o insecticidas (tratamientos de semillas y/o suelo).
- La concentración de oxígeno en el suelo: los procesos de germinación y emergencia obtienen la energía de las reservas de las semillas a través de la respiración, que es un proceso aeróbico. Esta es la razón por la que la fracción de plantas emergidas se puede reducir en gran medida en los suelos encharcados.

16.3. LAS DECISIONES RELACIONADAS CON LA SIEMBRA

El agricultor tiene que tomar una serie de decisiones operativas antes de la siembra del cultivo, tales como la fecha de siembra, la cantidad de semilla (densidad de siembra), la profundidad de siembra, el marco de plantación (distancia entre líneas, distancia entre plantas dentro de la línea). Otras operaciones adicionales pueden ser necesarias, tales como la fertilización, el riego, la aplicación de plaguicidas o un pase de labor.

El método de siembra que puede implicar la selección de la maquinaria para la siembra (p.ej. tipo de sembradora) es una decisión estratégica clave para el agricultor.

16.4. LA FECHA DE SIEMBRA

La elección de la fecha de siembra tiene que garantizar que el ciclo de cultivo coincida con el período más adecuado para el crecimiento y la formación del rendimiento. Una primera limitación en el crecimiento de un cultivo es su capacidad para sobrevivir cuando se expone a bajas temperaturas. En las latitudes medias, esta limitación permite clasificar los cultivos en dos categorías:

a) cultivos de siembra otoñal: son especies capaces de soportar las heladas y crecer a bajas temperaturas (cereales de invierno como el trigo o el centeno, colza, lino, habas, remolacha, etc.). Tienen una temperatura base relativamente baja, por debajo de 5ºC.

b) cultivos de siembra primaveral: son especies con alta temperatura base (maíz, algodón, soja), por encima de 10ºC. Pueden sufrir daños por bajas temperaturas por encima de cero (chilling injury).

Independientemente del tipo de cultivo, la siembra temprana puede tener varias ventajas:

a) La eficiencia en el uso del agua es inversamente proporcional al déficit de presión de vapor (Capítulo 14). Si los cultivos crecen en un periodo de baja demanda evaporativa (fecha de siembra temprana) pueden producir más biomasa y requerirán menos agua en condiciones de riego. Esto es especialmente importante en climas mediterráneos ya que la precipitación disminuye y aumenta la demanda evaporativa desde la primavera hasta el verano.

b) El proceso de llenado de grano es más eficiente y dura más si la temperatura no es demasiado alta. Si evitamos que este proceso ocurra en condiciones muy cálidas el índice de cosecha aumentará y también lo hará el rendimiento.

c) En algunos cultivos de primavera-verano el ciclo puede interrumpirse por las bajas temperaturas en otoño (p.ej., algodón). Por lo tanto la siembra temprana favorece que la maduración del cultivo se complete antes de que las bajas temperaturas detengan el desarrollo. Además, las precipitaciones de otoño pueden afectar negativamente a la calidad del cultivo.

d) En algunos cultivos hortícolas el precio es directamente proporcional a la precocidad (melón, sandía, etc.) por lo que la siembra temprana permite un aumento de los ingresos.

La siembra temprana puede estar limitada por posibles efectos negativos más adelante en el ciclo. Para los cereales de invierno es muy importante evitar las heladas durante la floración, lo que se consigue evitando siembras excesivamente tempranas y/o usando cultivares de ciclo largo (tipos de invierno con alto requerimiento de vernalización). Las condiciones ambientales en el momento de la siembra también pueden restringir las siembras tempranas:

- Si la temperatura es demasiado baja, el cultivo necesita mucho tiempo para emerger y establecerse, lo que permite el ataque de los agentes bióticos y conduce a una reducción significativa en la fracción de plantas establecidas. También bajo condiciones de baja temperatura, la competencia de las malas hierbas será más intensa. En general hay que sembrar con una temperatura tal que el período siembra-emergencia no exceda de 15-20 días. Para calcular el tiempo desde la siembra hasta la emergencia para diferentes cultivos en función de la temperatura, podemos utilizar la información que se presenta en la Tabla 16.1.

- El contenido de agua en el suelo en el momento de la siembra debe garantizar la imbibición de la semilla y el suministro de agua a las plántulas después de emerger. En las zonas mediterráneas la siembra de otoño suele retrasarse hasta que las lluvias han sido suficientes y la demanda de evaporación es baja. La siembra sobre suelo parcialmente seco puede causar emergencia relativamente temprana (con alta demanda evaporativa) pero las plántulas pueden morir si las lluvias no continúan.

Tabla 16.1. Temperatura base (T_b, ºC) y tiempo térmico (TT, ºC d) necesarios para completar la fase siembra-emergencia para distintas especies cultivadas. Los valores que se muestran en esta tabla se han obtenido experimentalmente en condiciones de campo con alto contenido de agua en el suelo y profundidad de siembra de aproximadamente 3 cm. Adaptado de Angus et al. (1980) Field Crops Res 3:365-378 y Moot et al (2000) New Zealand J Agric Res 43:15-25

	TT ºC d	T_b ºC
Amaranto	32	11.7
Cebada	120	0
Judía	52	10.6
Alforfón	37	11.1
Ricino	95	12.5
Garbanzo	94	4.5
Algodón	60	15.5
Pepino	40	15.5
Haba	200	1.2
Lenteja	90	1.4
Lino	89	1.9
Maíz	75	8
Melón	52	15.5
Mijo africano	40	13.5
Mijo (panizo)	42	10.9
Mijo (perla)	40	11.8
Mijo (común)	45	10.4
Avena	132	1.6
Guisante	110	1.4
Cacahuete	76	13.3
Pimiento	135	13
Colza	79	2.6
Centeno	91	2.2
Raigrás	130	2
Cártamo	70	7.4
Sésamo	21	16
Sorgo	74	8
Soja	70	9.9
Girasol	67	7.9
Tomate	57.5	9.3
Trébol	150	0
Sandía	55	15.5
Trigo	110	0

16.5. CANTIDAD DE SEMILLA Y DENSIDAD DE SIEMBRA

La cantidad de semilla que debe aplicarse por unidad de área (densidad de siembra) depende del coste de la simiente y de la densidad de siembra deseada.

a) El coste de la semilla: en general, el coste de la semilla es una pequeña fracción de los costes totales de cultivo. Sin embargo, las consecuencias de la utilización de poca semilla o semillas de baja calidad pueden ser muy negativas (ver la importancia de obtener una densidad de plantación adecuada en el capítulo 12). En general, debemos utilizar semillas de alta calidad. Los índices utilizados para caracterizar la calidad de la semilla son la viabilidad (porcentaje de germinación) y la pureza (proporción de la semilla que pertenece al cultivar adquirido). La semilla debe estar libre de plagas, enfermedades y semillas de malas hierbas y presentar un tamaño adecuado. La probabilidad de emergencia y la tasa de crecimiento de la plántula después de emerger son proporcionales al tamaño de la semilla.

b) Densidad: la cantidad de semilla utilizada debe ser suficiente para garantizar la emergencia y el establecimiento de un número suficiente de plantas. El exceso de semillas a usar depende de varios factores (viabilidad de las semillas, la estructura del suelo, presencia de patógenos, contenido de agua, etc.).

Para el cálculo de la dosis de siembra (g/m^2) podemos utilizar:

$$QS = \frac{p_u D_p}{f_1 f_2} \tag{16.1}$$

donde p_u es el peso medio por semilla (g/semilla), D_p es la densidad de plantas deseada (plantas m^{-2}), f_1 es la viabilidad (fracción) y f_2 es la fracción de semillas viables que se convierten en plantas establecidas. Los valores de p_u se pueden medir directamente pesando un número conocido de semillas o estimados utilizando la Tabla 16.2, que también muestra intervalos de D_p para diversos cultivos. La viabilidad (f_1) depende en gran medida de la calidad de la semilla, y se encuentra generalmente por encima de 0.9 para semillas certificadas. El valor de f_2 depende en gran medida del estado del suelo durante la siembra, de la profundidad de siembra y de las condiciones ambientales después de la siembra. Bajo condiciones adversas f_2 será proporcional al tamaño de la semilla.

Ejemplo 16.1.

Vamos a calcular la densidad de siembra de trigo para obtener una densidad de 150 plantas/m^2 si el porcentaje de semillas viables que emergen es del 90% y la semilla tiene una viabilidad de 0.95.

En la tabla 16.2 vemos que el peso de semillas de trigo es de 30-45 mg. Si tomamos un valor intermedio (37 mg/semilla) la dosis de siembra debe ser:

$$QS = \frac{37\ 10^{-3}\ x\ 150}{0.9 \cdot 0.95} = 6.5\ g\ m^{-2} = 65\ kg/ha$$

Tabla 16.2. Peso medio por semilla, densidad de plantas y dosis de siembra mínima para diferentes especies cultivadas.

Cultivo	Peso (fresco) por semilla			Densidad de plantas			Dosis de siembra		
	mg/semilla			plantas/m^2			kg de semilla/ha		
	min	max	media	min	max	media	min	max	media
Alfalfa	2.1	2.3	2.2	400	500	450	8	12	10
Algodón	100	120	110	5	10	75	5	12	8
Altramuz blanco	200	320	260	30	60	45	60	192	117
Altramuz amarillo	100	130	115	30	60	45	30	78	52
Avena	30	45	37.5	130	250	190	39	113	71
Cártamo	30	50	40	25	50	37.5	8	25	15
Cebada	30	50	40	150	230	190	45	115	76
Centeno	25	35	30	140	250	195	35	88	59
Colza	2.5	4	3.25	50	180	115	1	7	4
Garbanzo	50	70	60	25	45	35	13	32	21
Girasol (aceite)	100	140	120	6	12	9	6	17	11
Girasol (pipa)	150	180	165	4	7	5.5	6	13	9
Guisante	125	300	212.5	35	100	67.5	44	300	143
Haba	350	800	575	15	50	32.5	53	400	187
Judía	130	500	315	25	10	17.5	33	50	55
Lenteja	20	80	50	100	150	125	20	120	63
Lino	5	7	6	100	400	250	5	28	15
Maíz	350	400	375	7	10	8.5	25	40	32
Remolacha azuc.	20	20	20	6	9	7.5	1	2	2
Soja	100	200	150	15	60	37.5	15	120	56
Sorgo (grano)	20	30	25	10	13	11.5	2	4	3
Sorgo (forraje)	20	30	25	80	140	110	16	42	28
Trébol	0.6	0.8	0.7	500	900	700	3	7	5
Trigo	30	45	37.5	150	250	200	45	113	75
Triticale	30	50	40	180	220	200	54	110	80
Veza	20	30	25	200	300	250	40	90	63
Patata	23000	30000	27000	7.5	13.3	10	1725	3990	2700
Ajo	1500	6000	3500	20	28	24	300	1680	840
Ajo (tipo blanco)	1000	8000	5000	20	28	24	200	2240	1200
Cebolla	4	10	7	60	90	80	2.40	9.00	5.60
Pimiento	5	10	7	4	6	5	0.20	0.60	0.35
Tomate	2.2	3.3	2.8	2	6	4	0.04	0.20	0.11
Melón	29	47	38	0.4	1	0.7	0.12	0.47	0.27
Sandía	35	60	47	0.25	1	0.75	0.09	0.60	0.35
Puerro	2.5	3.2	2.8	16	38	25	0.40	1.22	0.70

16.6. PROFUNDIDAD DE SIEMBRA

La profundidad de siembra más adecuada depende de las condiciones de temperatura y contenido de agua del suelo. En general, el contenido de agua del suelo aumenta con la profundidad, mientras que la temperatura y la disponibilidad de oxígeno disminuyen. Cuanto mayor sea la profundidad de siembra mayor será la expansión del hipocotilo requerida para alcanzar la superficie del suelo. Si la profundidad es excesiva las reservas se agotarán antes de la emergencia. Por lo tanto, las semillas más grandes permiten siembras más profundas. Las semillas muy grandes (habas, judías) permiten profundidades de hasta unos 15 cm, mientras que las semillas de tamaño medio (cereales de invierno, girasol, algodón) no deben exceder alrededor de 10 cm de profundidad de siembra y las semillas pequeñas (cebolla, zanahoria) se deben sembrar a menos de 3 cm. En este último caso es difícil garantizar un contenido adecuado de agua del suelo en la capa superficial, lo que requiere de riego para asegurar la emergencia.

Las reglas acerca de profundidad de siembra pueden mostrar excepciones notables. Por ejemplo, en la zona árida del interior de la región del Pacífico noroeste de los EE.UU. el trigo de invierno se siembra a finales de verano a profundidades tan grandes como 20 cm para garantizar el suministro de agua a la semilla y la emergencia del cultivo.

16.7. PATRÓN ESPACIAL DE SIEMBRA Y MÉTODO DE SIEMBRA

Las plantas cultivadas generalmente se siembran en hileras con una separación entre 0.15-0.20 m (cereales, colza) y 1 m (p.ej. algodón). Las separaciones grandes entre líneas eran en muchos casos requeridas para el control mecánico de malas hierbas (pases entre líneas). La difusión en el uso de herbicidas ha permitido la reducción de la separación entre líneas, lo que contribuye a aumentar la interceptación de radiación.

En muchas especies el rendimiento es relativamente independiente de la distancia entre plantas (p.ej. cereales de invierno). En algunos (ajo, remolacha) el hacinamiento excesivo puede conducir a una reducción en el rendimiento o la calidad del producto cosechado.

El procedimiento de siembra a utilizar depende del tipo de cultivo, de las condiciones del suelo y de la maquinaria disponible. Los métodos utilizados son:

a) Voleo: las semillas se distribuyen aleatoriamente en el campo. La aplicación se puede hacer a mano, con abonadora centrífuga o con avión, como en el caso del arroz. Por lo general, una siembra a voleo requiere operaciones adicionales para enterrar las semillas, y conlleva un alto coste por el exceso de semilla a emplear, mala uniformidad de distribución e irregularidades en la profundidad de siembra.

b) Siembra en hileras: se realiza mediante la apertura de surcos en el suelo y depositando las semillas en su interior, lo que se suele hacer con una sembradora. Esta tiene los elementos necesarios para abrir el surco (bota, reja o disco), depositar las semillas y cerrar los surcos (cuchillas, discos). En algunos casos, para permitir las labores post-emergencia y lograr la densidad óptima de plantas, las hileras de cultivo se distribuyen de manera no uniforme como en el caso de las líneas pareadas, en las que las líneas se agrupan en pares cercanos, separados del siguiente par por una distancia suficiente para permitir las operaciones de laboreo entre líneas.

Las sembradoras de precisión proporcionan una mejor distribución de semillas lo que permite ahorrar semilla, y en algunos casos, evita la necesidad de aclareo de plantas (p.ej. remolacha azucarera).

16.8. OPERACIONES ADICIONALES

En el momento de la siembra se pueden realizar otras operaciones agrícolas que contribuyen al establecimiento del cultivo, como las siguientes:

a) El riego puede ser necesario para asegurar la germinación y la emergencia. En los suelos que forman costra superficial, puede ser necesario más de un riego para prevenir el endurecimiento de la costra.

b) Laboreo: las labores previas a la siembra deben contribuir a la formación de un lecho de siembra adecuado. Esto implica pequeños agregados en superficie y un contenido de agua suficiente en el horizonte superior. En algunos métodos de siembra, la semilla, una vez depositada en el suelo debe ser enterrada mediante un pase de grada. En otros casos puede ser necesario compactar ligeramente la superficie del suelo para asegurar el suministro de agua a la semilla (p.ej. pasar un rulo compactador en los cultivos de semillas pequeñas). La compactación del suelo después de la siembra también contribuye al calentamiento del suelo (Capítulo 6) y por lo tanto a una emergencia más rápida.

c) Aplicación de fertilizantes y productos fitosanitarios: es común aplicar fertilizantes (P, K y parte del N) y otros productos (p.ej. plaguicidas), mientras se prepara el lecho de siembra. Algunas sembradoras permiten la aplicación de fertilizantes localizada en el momento de la siembra, que puede ser de gran interés en suelos pobres, en especial para P y K (Capítulo 26). Otros productos (insecticidas de suelo, herbicidas de pre-emergencia) pueden ser también aplicados junto con la semilla.

16.9. EL TRASPLANTE DE PLANTAS ANUALES

En el caso de algunos cultivos hortícolas, las plántulas se cultivan en un semillero durante un tiempo y luego se trasplantan en el campo. La necesidad de trasplante se puede deber a:

a) El alto coste de las semillas, la baja germinación y/o las plántulas muy delicadas: las condiciones en el semillero se pueden manipular para proporcionar un entorno adecuado para las plántulas. Esto se puede lograr por calentamiento del suelo o el uso de cubiertas de plástico o de vidrio. El coste asociado será aceptable en el semillero debido a su pequeño tamaño.

b) La necesidad de acortar el ciclo: en el semillero se pueden mantener las condiciones adecuadas de humedad y temperatura, y por tanto acelerar el ciclo del cultivo en un momento en que las condiciones externas no son favorables.

Las estructuras utilizadas como semilleros van desde zonas protegidas de forma natural hasta los invernaderos. En el semillero se plantan las semillas a alta densidad. Las plántulas se mantienen en el semillero hasta su transplante final en el campo. Durante ese tiempo, se puede realizar aclareo de plantas para evitar la etiolación.

16.10. EL TRASPLANTE Y EL INJERTO DE LOS ÁRBOLES

Los árboles de interés agrícola son generalmente árboles frutales con densidades de siembra que van desde 50 hasta más de 1000 árboles/ha. Algunas especies de interés industrial (p.ej. árbol del caucho, alcornoque) y los árboles y arbustos ornamentales también pueden ser de valor comercial. Las plantaciones de árboles frutales se establecen para durar periodos largos, típicamente más de 15-20 años. Las especies de árboles frutales pueden ser de hoja perenne (cítricos, olivo) o de hoja caduca (frutales de pepita, frutales de hueso, frutos secos).

Las plantaciones se establecen mediante el trasplante de los árboles jóvenes criados inicialmente en viveros. En principio, los árboles se pueden transplantar en cualquier época del año, siempre y cuando las temperaturas no sean demasiado bajas. Sin embargo, un buen establecimiento requiere un equilibrio adecuado entre la absorción de agua por la raíz y la pérdida de agua por transpiración, para evitar la desecación y la muerte del árbol. El mejor momento para la siembra es el otoño cuando el árbol está inactivo, la temperatura del aire es baja y la temperatura del suelo aún no es muy fría, lo que favorece el crecimiento de raíces. Los árboles de hoja caduca se pueden plantar a raíz desnuda en otoño o primavera. Los árboles de hoja perenne deben ser transplantados con cepellón para garantizar un sistema radical activo por lo que se trasplantan directamente desde las macetas en las que han crecido en el vivero.

Un factor limitante típico del crecimiento de los árboles es la compactación del suelo por lo que una práctica común antes del transplante es la rotura de las capas compactadas del suelo mediante subsolado.

Aunque no son propiamente operaciones de plantación, la poda permite la renovación de la estructura de árbol, mientras que el injerto se utiliza para cambiar la variedad que constituye la mayor parte de la copa del árbol, mientras el patrón se mantiene.

BIBLIOGRAFÍA

Connor DJ, Loomis RS, Cassman KG (2011) Crop ecology: productivity and management in agricultural systems (2nd ed) Cambridge University Press

Kirby EJM (1993) Effect of sowing depth on seedling emergence, growth and development in barley and wheat. Field Crops Res, 35: 101-111

Capítulo 17

El laboreo

J.A. GÓMEZ
F. ORGAZ
H. GÓMEZ-MACPHERSON
F.J. VILLALOBOS
E. FERERES

RESUMEN:

El laboreo se ha desarrollado dentro de las prácticas agrícolas para mejorar las condiciones del suelo en relación con el balance de agua y el crecimiento del cultivo, para incorporar residuos de los cultivos, y para el control de malas hierbas y la preparación del lecho de siembra. Los efectos del laboreo dependen en gran medida del contenido de agua y de las características del suelo. Los suelos arcillosos no se encuentran generalmente en las condiciones más adecuadas para el laboreo, que son más fáciles de encontrar en suelos de texturas intermedias o gruesas. Los principales efectos indeseables del laboreo son la compactación del suelo, que conduce a una reducción del rendimiento de los cultivos y la degradación del suelo, sobre todo debida a la erosión hídrica (Capítulo 18). La erosión de las capas superficiales del suelo reducen la fertilidad natural y la capacidad de retención de agua del suelo.

17.1. INTRODUCCIÓN

Desde el punto de vista de la agricultura, el suelo a menudo ha sido visto como un simple medio en el que crece el cultivo. Así, la estructura del suelo debe ser adecuada para la germinación de las semillas y el crecimiento de las raíces, y debe tener características adecuadas para el almacenamiento y suministro de agua, nutrientes, gases y calor para el cultivo. Desde esta perspectiva el laboreo es inseparable de la agricultura. La transformación de un ecosistema natural en un agroecosistema requiere necesariamente una intervención mecánica en el suelo. Desde el laboreo con azada, y luego el arado romano, seguido más tarde por el arado de vertedera, y, finalmente, el desarrollo de sistemas de tracción mecánica, labrar y cultivar han sido prácticamente sinónimos.

Cada sistema suelo-cultivo-clima presenta problemas específicos que requieren del uso de diferentes operaciones de laboreo, lo que ha llevado al desarrollo de diversas máquinas cuya ingeniería es bien conocida. Desafortunadamente, se sabe mucho menos acerca de los efectos del laboreo sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, y en última instancia sobre los efectos en el rendimiento del cultivo. Este conocimiento limitado, a menudo se traduce en prácticas de laboreo cuya única razón de ser es la costumbre o la tradición de los tiempos en que el laboreo se realizaba utilizando tracción animal.

En la agricultura occidental el laboreo tradicional o convencional, que se caracteriza por un gran número de operaciones, utilizando diversos implementos y tractores potentes, se cuestiona cada vez más por el alto coste energético y por la degradación del suelo que genera diferentes problemas ambientales en numerosas zonas agrícolas. La racionalización del laboreo requiere considerar el suelo como un recurso valioso y debería basarse en una mejor comprensión de los efectos del laboreo sobre las propiedades del suelo y sobre la producción de los cultivos, que es el objetivo de este capítulo.

17.2. OBJETIVOS DEL LABOREO

Tradicionalmente el laboreo tenía tres objetivos principales, que eran la preparación del lecho de siembra, la mejora de las condiciones del suelo para el crecimiento de los cultivos y el control de malas hierbas. Sin embargo, los objetivos han cambiado con la aparición de nuevas tecnologías (herbicidas, sembradoras), nuevas cuestiones o problemas (compactación, erosión, contaminación) y una mejor comprensión de la importancia de algunas funciones del suelo (como sumidero de carbono o como filtro natural del agua). En la agricultura de secano el laboreo es además una herramienta esencial para manipular el balance de agua con el fin de mejorar la disponibilidad de agua para el cultivo.

17.2.1. La preparación del lecho de siembra

Este es un proceso que a menudo requiere la eliminación de los residuos de cultivos anteriores. La eliminación se puede hacer por la quema de los residuos o enterrándolos con ciertas labores. La quema de rastrojos es un método rápido y barato que ha sido ampliamente utilizado en el pasado y tiene algunas ventajas claras, como la eliminación de las semillas de malas hierbas, la destrucción de los propágulos de patógenos y huevos y larvas de insectos, y la liberación inmediata de algunos nutrientes. Pero la quema provoca una pérdida de materia orgánica y N (perdido como óxidos volátiles de N), contribuye a la contaminación del aire y a las emisiones antropogénicas de CO_2, favorece la degradación del suelo en general y aumenta los riesgos de incendio.

Después de eliminar los residuos, es posible proceder a la preparación del lecho de siembra, que idealmente se compone de una capa superficial de estructura granular con un alto porcentaje de agregados más pequeños que la semilla. En general sólo se logra este objetivo si se labra con un contenido de agua en el suelo cerca de capacidad de campo, en el contenido óptimo de agua para labrar (OPT, p.ej., Dexter et al., 2001) (véase 17.3), un punto que se denomina tempero. En algunos casos es necesario compactar ligeramente el lecho de siembra después de sembrar con un rodillo compactador para mejorar el contacto semilla-suelo y la hidratación de las semillas. Además, debajo de la profundidad de siembra, el suelo debe tener una densidad aparente relativamente baja para permitir el crecimiento de las raíces sin restricciones, lo que a menudo se consigue mediante una labor profunda previa a la siembra.

17.2.2. Control de malas hierbas

Antes de la llegada de los herbicidas, el laboreo era el único método efectivo para el control de las malas hierbas. El control puede ser directo mediante la destrucción de las plantas, cortando la raíz o el tallo o enterrándolas, o indirecto, cambiando la posición de los propágulos de malas hierbas o modificando las condiciones ambientales del banco de semillas de las malas hierbas. Por ejemplo, el arado de vertedera entierra muchas semillas por debajo de una cierta profundidad haciendo que no puedan emerger. En otros casos, como en el de las malas hierbas que se propagan mediante órganos subterráneos (tubérculos, rizomas), el laboreo contribuye al troceado de esos órganos y por lo tanto mejora la dispersión de la mala hierba cuando el suelo está mojado pero puede tener el efecto contrario cuando el suelo está seco ya que los propágulos morirán por deshidratación.

En la estrategia de control de malas hierbas mediante laboreo es esencial labrar inmediatamente antes de la siembra para minimizar la competencia mala hierba-cultivo. Esta operación puede reducir el contenido de agua del lecho de siembra y por lo tanto causar una mala emergencia de las plántulas en ambientes secos. Esto ocurre, por ejemplo, con la siembra en primavera de girasol de secano. Este efecto negativo puede ser resuelto mediante la sustitución de la labor por una aplicación de herbicida antes de la siembra.

En aquellos cultivos para los cuales no existen herbicidas selectivos o cuando no son muy eficaces contra la comunidad de malas hierbas, se requerirán labores entre líneas después de la emergencia del cultivo. Aunque es posible controlar las malas hierbas solamente con el laboreo, el uso de herbicidas, al menos parcialmente, a menudo es una alternativa mucho más eficaz en términos de coste y tiempo.

17.2.3. Modificación del balance hídrico

En los cultivos de secano el objetivo principal del laboreo es mejorar el balance de agua para maximizar la disponibilidad de agua para el cultivo. En un ecosistema natural, con el suelo cubierto de vegetación, los macroporos formados por las raíces y la mesofauna permiten tasas altas de infiltración estables en el tiempo, incluso cuando la densidad aparente es alta. La situación es muy diferente en un agroecosistema ya que la preparación del suelo implica el tráfico de maquinaria y la superficie del suelo se mantiene al descubierto. Este tipo de laboreo da lugar a una densidad aparente baja, pero en un sistema de poros en el que muchos de los poros son menos estables que los macroporos formados por la vegetación o la fauna del suelo o incluso están ocluidos sin conexión con la superficie del suelo (Figura 17.1). En esta situación, el impacto de las gotas de agua rompe los agregados del suelo y provoca el sellado de los poros, reduciendo así la tasa de infiltración. Esto se invierte después de labrar, al romper la costra superficial y al aumentar la porosidad del suelo y la rugosidad de la superficie, pero el efecto es temporal y la tasa de infiltración se irá reduciendo conforme se producen nuevos eventos de lluvia. La velocidad del sellado de la superficie no sólo depende de la cantidad de precipitación, sino también de las características del suelo, especialmente de su estructura (estrechamente relacionado con la textura del suelo y el contenido de materia orgánica), que es mejor en suelos naturales no alterados cubiertos por pastos o bosques.

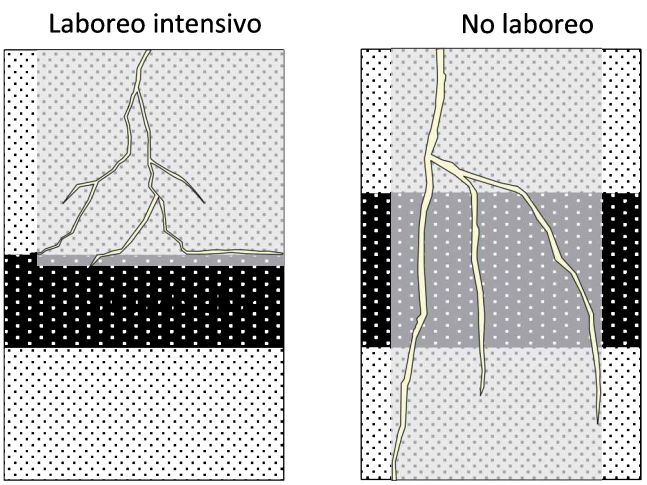


Figura 17.1. Modelo conceptual de la porosidad del suelo en terreno labrado y en terreno no labrado a largo plazo. Adaptado de Ontario Ministry of Agriculture and Food.

El laboreo por tanto sirve para romper la costra superficial, y además aumenta la porosidad, lo que mejora la capacidad de retención de agua y la aireación, que a su vez promueve el crecimiento de las raíces.

En muchas zonas de secano los agricultores consideran el laboreo un método eficaz para reducir la evaporación desde la superficie del suelo (E_s). De hecho, en suelos propensos a la formación de grietas, el sellado de las grietas de la superficie por el laboreo ayuda a reducir E_s. Las grietas grandes aumentan la evaporación en horizontes de suelo relativamente profundas en zonas desérticas siempre que el transporte del agua desde los poros de la matriz hasta las paredes de la grieta no sea un factor limitante. Esto explicaría la adopción de pases de cultivador entre líneas en los cultivos de verano (p.ej., algodón) en suelos expansivos. En muchos casos, sin embargo, el laboreo puede aumentar la evaporación del suelo. La evaporación de una superficie de suelo seco es muy pequeña (segunda fase, limitada por suelo; ver Capítulo 9). Si se labra un suelo seco en superficie, la tierra seca superficial se mezcla con el suelo húmedo que hay debajo, lo que aumenta la evaporación. En la Figura 10.3 (Capítulo 10) se describe un aumento en la evaporación el día 157 que se debió a una escarda mecánica para control de mala hierbas. A largo plazo, el impacto del laboreo sobre E_s es relativamente bajo ya que la mayoría de la evaporación ocurre antes de que el tractor y sus aperos puedan entrar en el campo. Por lo tanto, con la excepción de los suelos expansivos, el efecto de cualquier sistema de laboreo sobre la evaporación desde el suelo tiene mucho menos impacto sobre el balance de agua que los efectos sobre la infiltración.

17.2.4. Otros objetivos

El laboreo puede servir para otros fines, tales como la modificación del balance de energía, o la incorporación de abonos o enmiendas del suelo. Por ejemplo, la reducción de la densidad aparente y del contenido de agua en el suelo después de labrar aumenta la difusividad térmica que favorece un calentamiento más rápido de la superficie del suelo.

A veces nos encontramos con algunas prácticas de laboreo cuyos objetivos no están muy claros y que pueden deberse más a la tradición o a razones estéticas. Tradicionalmente los buenos agricultores mantienen sus campos "limpios" de malas hierbas en todo momento y esto ha dado lugar al laboreo excesivo y a la adopción de prácticas no sostenibles.

17.3. INFLUENCIA DE LA HUMEDAD DEL SUELO EN LOS EFECTOS DEL LABOREO

La energía necesaria para labrar el suelo y los efectos del laboreo dependen del contenido de agua del suelo. En suelos de textura media o fina la fuerza de cohesión de los agregados del suelo disminuyen con el aumento del contenido de agua. Las fuerzas de adhesión entre el suelo y los aperos aumentan con el contenido de agua

hasta un máximo, en el que el suelo pasa del estado plástico, es decir, moldeable, al estado líquido. En el estado líquido, el laboreo provoca la dispersión de las partículas del suelo y el suelo pierde su estructura. El estado cohesivo del suelo se produce con bajo contenido de agua y no permite deformaciones sin rotura de los agregados. En este estado del suelo una labor con vertedera genera grandes bloques de agregados con grandes espacios entre ellos. Entre el estado cohesivo y el estado plástico hay un punto en el que la suma de las fuerzas de adhesión y de cohesión es mínima, que se produce con un contenido por debajo de capacidad de campo. En este estado, que se llama tempero, y es el del contenido óptimo de agua para labrar (OPT, p.ej., Dexter et al. 2001), el suelo se desmigaja después de labrar (Figura 17.2).

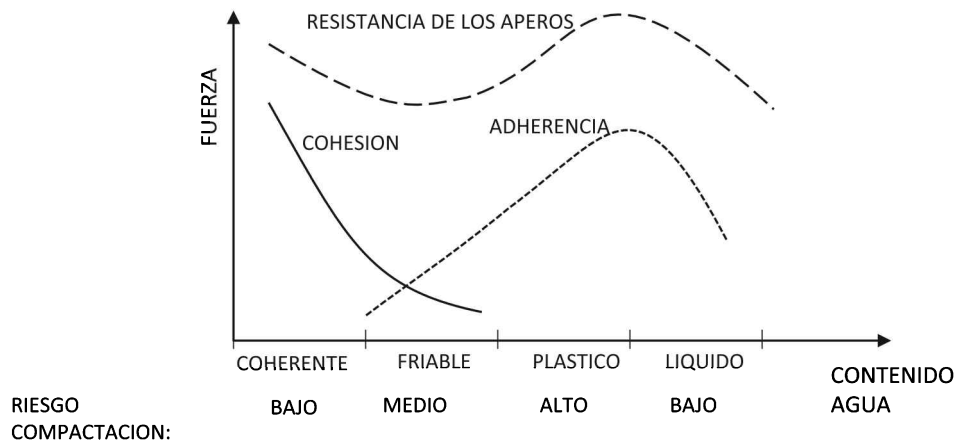


Figura 17.2. Fuerzas de cohesión y de adhesión entre suelo y aperos en función del contenido de agua del suelo.

El contenido de agua del suelo no sólo determina los efectos del laboreo sobre las condiciones del suelo, sino también el grado de compactación del suelo debido al tráfico de la maquinaria. La compactación del suelo se produce principalmente en el estado plástico, pero no es probable que sea importante en suelos secos, ya que en este caso la fuerza provoca la rotura de los agregados. En el estado plástico se pueden distinguir dos zonas, por encima y por debajo del punto de adhesión: por encima de ese punto, el suelo se adherirá a una superficie lisa de corte, como es el caso de los aperos. Esto implica un gasto de energía alto para labrar y el peligro de cementación una vez que el suelo se seca.

La mejor condición para labrar se produce en una gama de contenidos de agua por debajo de la capacidad de campo. Esto ocurre aproximadamente 2-3 días después de la lluvia o el riego para suelos de textura media. En esta zona la energía necesaria para el laboreo es mínima y se consigue una estructura granular, que es desea-

ble para el lecho de siembra mientras que el riesgo de compactación es moderado. Los suelos de textura de media a gruesa drenan bien, y tienen un estrecho rango de estado plástico, por lo que alcanzan rápidamente el estado óptimo después de una lluvia o riego, y permanecen así durante mucho tiempo. Ese estado, sin embargo, no es fácil de conseguir en suelos arcillosos donde el drenaje es lento y el intervalo de estado plástico es muy amplio. Si labramos en ese estado el suelo se corta en rodajas, que se vuelven muy duras al secarse y la labor apenas aumenta la porosidad del suelo. Además, el riesgo de compactación es máximo cuando un suelo se labra en el estado plástico. Para favorecer el drenaje de suelos arcillosos es necesario iniciar las labores mucho antes de la llegada de las lluvias. Sólo así será posible obtener una condición de humedad adecuada antes de la siembra. El inconveniente es que el laboreo en la estación seca, cuando el suelo se encuentra en estado coherente, requiere mucha energía y genera grandes terrones que luego deben ser desagregados mediante labores secundarias. Ese refinado posterior puede ser muy difícil cuando la precipitación es baja. Las desventajas de labrar con suelo seco no se producen en suelos arenosos, ya que no muestran un estado cohesivo.

17.4. EL LABOREO CONVENCIONAL

El mantenimiento de la tasa de infiltración, el control de malas hierbas y la preparación del lecho de siembra requieren la realización de varias labores que varían ampliamente dependiendo de las áreas geográficas, los tipos de suelo y los cultivos. Este conjunto de operaciones, que llamamos laboreo convencional, se pueden clasificar según diferentes criterios. En la agricultura convencional es común distinguir entre labores primarias y secundarias. Las labores primarias se realizan con arado de vertedera o arado de disco en algún momento después de la recolección y sirven para incorporar residuos del cultivo y para mejorar las condiciones del suelo. El arado de vertedera corta, levanta y voltea el suelo hasta 40 cm de profundidad como máximo. Este proceso mejora la infiltración, incorpora los restos de cultivos, y entierra el banco de semillas de malas hierbas. Para la ruptura de capas profundas compactadas se emplean los subsoladores que pueden alcanzar mayores profundidades (60-70 cm), y realizan un corte vertical, de manera que los residuos no se incorporan. Los subsoladores han sustituido a los arados de vertedera en muchas zonas, dejando el 50-80% de los residuos sobre el suelo. El arado de cincel (chisel) realiza una labor vertical similar pero menos profunda (30 cm) que los subsoladores.

Las labores secundarias se realizan con gradas, cultivadores y otros implementos, y afectan sólo a los 10-20 cm superficiales. Sirven para refinar el suelo antes de la siembra (reduciendo el tamaño de los agregados en la superficie) y para controlar las malas hierbas. Las labores primarias a menudo resultan en grandes agregados que se desmenuzan después mediante pases de grada. La estructura más fina se consigue con cultivadores, que también se utilizan para el control de malas hierbas antes y después de la siembra (pases entre líneas). Para completar el refinado de los agregados y/o para la compactación de las capas superficiales del suelo, se pueden usar diversos aperos (p.ej., rulo-compactador, grada de púas).

Ejemplo 17.1.

Plan de laboreo convencional para girasol en una rotación trigo-girasol en una zona mediterránea. Después de quemar el rastrojo de trigo en verano se pasa un arado de vertedera lo que da lugar a grandes agregados y muchos huecos. Después de las primeras lluvias podemos usar un cultivador o una grada de discos para reducir el tamaño de los agregados. A continuación se necesitan dos pases adicionales de cultivador en otoño-invierno para eliminar las malas hierbas, y otro antes de la siembra. Además se pueden requerir 1-2 pases de cultivador entre líneas para controlar las malas hierbas durante la campaña. Los costes del laboreo en este sistema pueden ascender a más del 60% de los costes totales del cultivo de girasol.

17.5. COMPACTACIÓN Y SUELA DE LABOR

La existencia de capas compactadas puede deberse a causas naturales (p.ej. horizontes petrocálcicos), pero es un fenómeno muy extendido por culpa del laboreo. La compactación puede ocurrir en la capa superior (con varios mm de profundidad) del suelo debido al impacto de la lluvia. Esta costra superficial dificulta la emergencia de las plántulas, sobre todo si el suelo está seco, y reduce la infiltración (Figura 17.3). El laboreo secundario favorece la formación de costras superficiales cuando genera agregados muy finos en superficie.

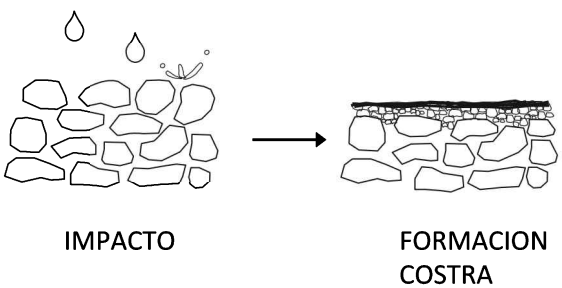


Figura 17.3. Representación esquemática de la formación de una costra deposicional. Adaptado de Cattle et al. (2004) In: SuperSoil 2004: 3rd Australian-New Zealand Soils Conference, Dec 2004, Univ of Sydney, Australia (published on CDROM)

Otro tipo de horizontes compactados son los que están dentro del perfil del suelo, que no sólo retrasan o impiden el crecimiento del sistema radical, sino que también provocan una reducción del crecimiento de la parte aérea de la planta y, por último, pérdidas de rendimiento (Fig. 17.4), aun cuando el suministro de agua y los nutrientes no sean limitantes. La figura 17.5 muestra la relación entre la resistencia a la penetración y el contenido de agua del suelo para un suelo franco con o sin compactación. Teniendo en cuenta que con una resistencia a la penetración de 3.2 MPa el crecimiento de la raíz se reduce considerablemente, se puede deducir que el crecimiento de la raíz en suelos compactados se va a ver restringido en gran medida. La compactación tiene otros efectos secundarios tales como favorecer el encharca-

miento, lo que promueve la desnitrificación (véase el Capítulo 24), la anoxia de la raíz y una mayor incidencia de enfermedades del suelo (p.ej. *Phytophthora*).

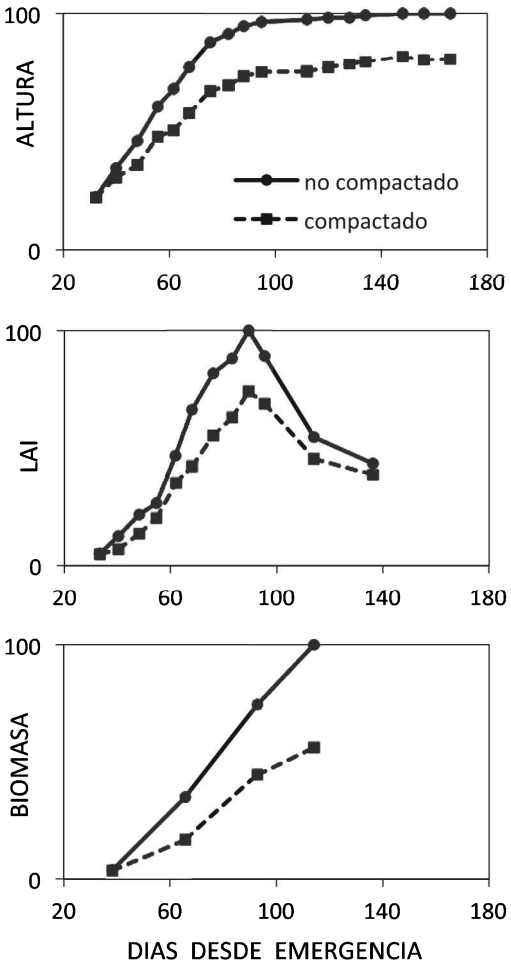


Figura 17.4. Evolución temporal de LAI (índice de área foliar) y biomasa del algodón en suelo no compactado (línea continua) y suelo compactado (línea de puntos). Adaptado de Coelho et al. (2000) Soil Tillage Res 57(3):129-142

La compactación es causada por la transmisión del peso de los aperos (vertedera, discos) a la profundidad en la que actúan resultando en una suela de labor, y/o por las ruedas del tractor o de otras máquinas que compactan todo el horizonte superficial. En cualquier caso, la magnitud de la compactación depende de la presión ejercida (regulada por la carga por eje y el tipo y la presión del neumático) y del contenido de agua del suelo en el momento de la operación, por lo que el tráfico debe ser evitado si el suelo está en el estado plástico. Esta es la razón por la que el riesgo de compactación es muy alto en suelos arcillosos. En este caso, además, el

estado plástico promueve que la compactación se transmita en profundidad. Por el contrario, en suelos de textura media el riesgo de compactación suele ser más bajo y genera una capa compactada por debajo de la profundidad de labor (Fig. 17.1). Esta es la razón por la cual, para aliviar los problemas de compactación, el subsolado es más eficaz en suelos de textura media que en los suelos arcillosos.

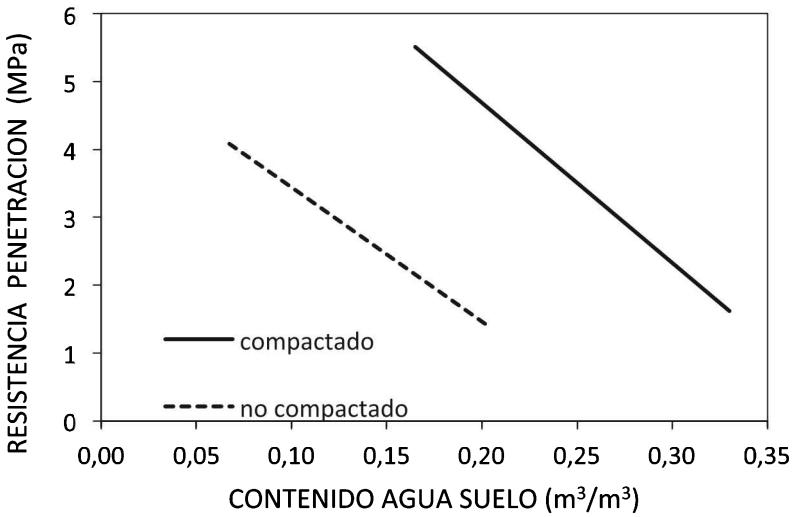


Figura 17.5. Relación entre la resistencia a la penetración y el contenido de agua del suelo para distintos valores de densidad aparente en un suelo franco arenoso. Adaptado de Coelho et al. (2000) Soil Tillage Res 57(3):129-142

17.6. LOS REQUERIMIENTOS DE ENERGÍA DEL LABOREO

El laboreo primitivo se realizaba únicamente con herramientas manuales. Después apareció el arado romano con animales de tiro y más tarde el arado de vertedera, hasta el presente, en el que el laboreo se realiza con tractores de gran potencia que requieren fuentes externas de energía (combustible fósil).

Aparte del riesgo de compactación, el laboreo ha sido cuestionado debido a que aumenta el riesgo de erosión del suelo y por su gran gasto de energía. Estos efectos negativos han fomentado la adopción de sistemas de laboreo reducido (véase el Capítulo 18). En la sección 7.4 discutimos la clasificación de las entradas de energía en las operaciones agrícolas. En el caso del laboreo sólo dos componentes son relevantes para el cálculo de los requerimientos de energía por unidad de superficie:

$$E_{req} = E_{dir} + E_{ind} = E_{combustible} + E_{ind\,(tractor)} + E_{ind\,(máquina)} \quad (17.1)$$

El componente directo es la energía consumida en el combustible y el componente indirecto es la que corresponde a la fabricación, mantenimiento y reparación del tractor y aperos o máquinas. El cálculo de las necesidades energéticas indirectas (MJ/ha) se puede realizar con la siguiente ecuación:

$$E_{ind\ (tractor)} + E_{ind\ (máquina)} = \frac{M_{tractor} EM_{tractor}}{L_{tractor}\ MFC} + \frac{M_{máquina} EM_{máquina}}{L_{máquina}\ MFC} \quad (17.2)$$

donde M es la masa (kg), EM es la relación de la energía requerida y la masa (MJ/kg), L es la vida útil (horas) y MFC es la capacidad de campo de la máquina o apero (ha/hora). Usando valores medios de estos parámetros hemos calculado las necesidades de energía indirectas de diferentes operaciones que se muestran en la Tabla 17.1. Los valores típicos de necesidades directas también se presentan a modo comparativo. Estos datos deben tomarse simplemente como ejemplos. Las necesidades directas reales serán mayores cuando el laboreo se realiza bajo condiciones que se aparten del óptimo del suelo. Las necesidades indirectas reales pueden diferir si los parámetros M, EM, L o MFC cambian. El consumo de energía se incrementa con el uso de tractores muy potentes para operaciones que requieren poca energía. La energía empleada será también proporcional a la profundidad de la labor, y depende de la forma de las rejas o los discos de los implementos.

Tabla 17.1. Requerimientos de energía de diferentes operaciones agrícolas calculados con las ecuaciones 17.2 y 17.3. La energía diaria necesaria para mano de obra se ha tomado como 1000 MJ/día que corresponde a agricultores de países desarrollados. La duración del trabajo (WD) se ha supuesto de 10 horas/día.

Operación	Indirecto			Directo	Total	Mano obra	Total
	tractor	máquina	total				inc.mano obra
	MJ/ha						
Vertedera	80	133	213	1000	1213	80	1293
Pulverizador	13	5	18	68	86	13	98
Abonadora	11	2	13	73	86	11	97
Siembra líneas	28	103	131	200	331	28	360
Rodillo	29	48	77	200	277	29	306
Grada de discos	69	20	90	264	354	69	423
Cultivador	20	27	47	220	267	20	287
Sembradora no laboreo	42	135	177	200	377	42	419
Cosechadora	0	646	646	500	1146	51	1197

Muchos estudios sobre las necesidades de energía de las prácticas agrícolas ignoran la energía asociada al trabajo humano. La Tabla 17.1 muestra también la energía necesaria para mano de obra, calculada como:

$$E_{manual} = \frac{EL}{WD\ MFC} \tag{17.3}$$

donde EL es la energía diaria necesaria para el ser humano (MJ/día) y WD es la duración del trabajo (horas/día). El valor de EL depende en gran medida de las condiciones de vida de los agricultores (Capítulo 7). Incluso usando un valor muy alto (EL = 1000 MJ/día) la fracción de energía debida a la mano de obra es pequeña (5-15%) (Tabla 17.1).

La importancia relativa del laboreo en los requerimientos energéticos de la agricultura es limitada. En el ejemplo 7.2 (Capítulo 7) vimos el caso de una explotación de trigo de secano que producía 2500 kg de m.s. de grano/ha, con un requerimiento total de energía de 14779 MJ/ha (1500 para el laboreo, 1900 para la siembra, cosecha y otras operaciones, 9613 para el fertilizante, 1050 para las semillas y 716 para pesticidas). En este caso el laboreo se limita a un pase de vertedera y un pase de cultivador y la fracción de la energía utilizada en el laboreo es sólo el 10% del total, gracias a la utilización de herbicidas. Incluso con laboreo más intensivo, su contribución al gasto de energía es pequeña en comparación con la inversión de energía en los fertilizantes. Por lo tanto, la adopción de laboreo reducido o no laboreo debe ser promovido principalmente para mejorar las condiciones del suelo en lugar de para el ahorro de energía.

BIBLIOGRAFÍA

ASAE Standards (2000) D497, Agricultural machinery management data. ASABE, St. Joseph, MI, USA

Aluko OB, Koolen AJ (2000) The essential mechanics of capillary crumbling of structured agricultural soils. Soil Tillage Res 55: 117–126

Botta GF, Tolon-Becerra A, Tourn M, Lastra-Bravo X, Rivero D (2012) Agricultural traffic: Motion resistance and soil compaction in relation to tractor design and different soil conditions. Soil Tillage Res 120: 92–98

Coelho MB, Mateos L, Villalobos FJ (2000) Influence of a compacted loam subsoil layer on growth and yield of irrigated cotton in Southern Spain. Soil and Tillage Res 57: 129–142

Dexter AR, Bird NRA (2001) Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. Soil and Tillage Res 57: 203-212

Capítulo 18

La conservación del suelo

H. GÓMEZ-MACPHERSON
J.A. GÓMEZ
F. ORGAZ
F.J. VILLALOBOS
E. FERERES

RESUMEN:

El laboreo sirve para mejorar las condiciones del suelo en relación con el balance de agua y el crecimiento de los cultivos, para incorporar residuos de cultivos, para controlar las malas hierbas y preparar el lecho de siembra. Sin embargo, el laboreo aumenta significativamente el riesgo de erosión del suelo. Este problema ha llevado al desarrollo de técnicas de laboreo de conservación que normalmente se basan en el mantenimiento de los residuos vegetales sobre el suelo y en una reducción sustancial de las labores. Cuando el laboreo de conservación se combina con el empleo de rotaciones de cultivos se denomina agricultura de conservación. El laboreo de conservación requiere el uso de herbicidas y sembradoras especiales para la siembra directa. La transición de laboreo convencional a laboreo de conservación debe ser gradual ya que pueden surgir problemas adicionales (p.ej. compactación) en algunos tipos de suelo. En esos casos se podría adoptar el laboreo esporádico o el tráfico controlado. En plantaciones de árboles se dispone de muchas opciones para el manejo del suelo, desde el laboreo convencional al no laboreo con aplicaciones de herbicidas y suelo desnudo. Un caso particular es el de las plantaciones de secano en zonas mediterráneas, donde los problemas del no laboreo (erosión en cárcavas, baja infiltración) se pueden aliviar en parte por cubiertas herbáceas temporales que protegen el suelo durante la época de lluvias y son eliminadas a principios de primavera para evitar la competencia por el agua con los árboles.

18.1. INTRODUCCIÓN

La erosión del suelo es la principal amenaza para la sostenibilidad de los sistemas agrícolas en muchas zonas del mundo. El desarrollo de potentes tractores en el siglo pasado permitió la rápida mecanización de las operaciones de laboreo, pero también dio lugar a una reducción de la cobertura del suelo por la vegetación y los residuos, una disminución de la materia orgánica del suelo, y un deterioro de la estructura del suelo, y por lo tanto, a un mayor riesgo de erosión por agua y por viento. El período del "Dust Bowl" en EE.UU. en la década de 1930 es un ejemplo de la relevancia de este problema.

La conservación del suelo en tierras agrícolas no es una tarea sencilla. El éxito requiere la adaptación de diversas prácticas de manejo del suelo a las condiciones locales, así como tener en cuenta los costes y la rentabilidad. Lo que se recomienda es el desarrollo de un conjunto de prácticas basadas en la adaptación y la adopción de un paquete de tecnologías agronómicas conocidas como directrices de laboreo de conservación que permitan la mínima perturbación del suelo, el mantenimiento de la cobertura del suelo con vegetación y/o residuos, y la diversificación espacio-temporal de los sistemas de cultivo.

18.2. LA EROSIÓN DEL SUELO

La erosión es el proceso de pérdida de suelo. En primer lugar, requiere energía para arrancar las partículas, y en segundo, de algún medio de transporte. La energía se obtiene a partir del impacto de las gotas de lluvia y la transferencia de cantidad de movimiento del agua (escorrentía superficial) o el viento. El medio de transporte será el fluido (agua o aire). La erosión hídrica es proporcional a la escorrentía que depende de la relación entre la precipitación y la infiltración (Capítulo 8) y un parámetro (Erodibilidad) que refleja la facilidad con la que se erosiona el suelo. La erodibilidad depende sobre todo de la estabilidad estructural del suelo que está relacionada con el contenido de materia orgánica, así como con la textura del suelo. En los suelos desnudos con agregados finos la erodibilidad es muy alta.

La erosión tiene dos efectos importantes sobre el sistema agrícola: la pérdida de suelo supone una disminución de la profundidad del suelo que a su vez implica una reducción de la capacidad de almacenamiento de agua, y por lo tanto una reducción en el rendimiento a largo plazo. Por otra parte el suelo perdido de la superficie es a menudo más rico en nutrientes, por lo que la erosión implica una pérdida de fertilidad (y de potencial de rendimiento), y causa un problema ambiental (sedimentos y contaminantes que se acumulan en las aguas superficiales). Por desgracia, no es fácil controlar la erosión debido a su naturaleza efímera, y, a menudo, la mayor parte de la erosión se produce en unos pocos episodios de lluvias torrenciales. En cualquier caso, el laboreo excesivo destruye la estructura del suelo y mantiene la superficie del suelo expuesta al viento y a la lluvia durante periodos prolongados, por lo que es la causa principal de la erosión en muchos sistemas agrícolas. A pesar de que una labor aumenta inicialmente la infiltración, su efecto es pasajero y, en algu-

nos suelos de textura limosa fina, puede favorecer la rápida formación de una costra superficial tras una lluvia.

En una escala mayor, la erosión es un proceso con retroalimentación positiva: la pérdida de suelo implica una reducción de la vegetación que a su vez intensifica la erosión, lo que conduce finalmente a la desertificación (el proceso por el cual una región seca se vuelve cada vez más árida, por lo general con la pérdida de sus masas de agua y de la vegetación), que está avanzando en algunas zonas del planeta, siendo la erosión del suelo uno de sus motores principales.

Se han propuesto varios métodos para cuantificar la erosión del suelo entre los cuales el más popular es la USLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo) y su versión revisada, RUSLE (Renard et al., 1997). Ambos fueron diseñados para predecir el efecto de diferentes manejos del suelo sobre las tasas anuales medias de erosión a escala de ladera. De acuerdo con la RUSLE, el promedio de pérdida de suelo por erosión (SLE, t/ha/año) se calcula como el producto de seis factores:

$$SLE = R_1 \; K_1 \; L_1 S_1 \; C_1 \; P_1 \qquad (18.1)$$

en la que R_1 es la erosividad media anual de la lluvia, que es una medida de la energía de la lluvia disponible para la erosión hídrica. Depende de la cantidad e intensidad de la precipitación y su cálculo se explica en detalle por Renard et al. (1997). Hay varias ecuaciones que se pueden utilizar como una aproximación regional, tales como la ecuación 18.2, calibrada para los EE.UU. y basada en la distribución de precipitaciones mensuales:

$$R_1 = 4.17 \; \Sigma(P_i^2/P) \; -152 \qquad (18.2)$$

donde P_i es la precipitación (mm) del mes i, y P es la precipitación anual (mm).

K_1 es el factor susceptibilidad de erosión del suelo, y es equivalente a la tasa de pérdida de suelo (t/ha/año) que se produciría en condiciones estándar, es decir, si el terreno se mantiene como barbecho limpio, y tiene una pendiente del 9% y una longitud de 22 m. Depende de la textura y de la materia orgánica del suelo. Los valores se pueden estimar a partir de los mostrados en la Tabla 18.1.

Tabla 18.1. Parámetros para el cálculo de la pérdida de suelo utilizando el USLE.
M = Maíz, P= pasto (cultivos forrajeros), C = cereales, S = Soja
Fuentes: Para K_1 y NT: Stewart et al. 1975. US EPA Report No. 600/2-75-026 or USD. Rep No.ARS-H-5-1. Para C_1 y P_1: Franzmeier et al. (2009) Indiana Soils. Evaluation and Conservation. Purdue Univ.

Textura	K_1		
	MO baja	MO media	MO alta
Arcilloso	0.54	0.49	0.47
Franco arcilloso	0.74	0.67	0.63
Franco arenoso grueso	0.16	0.16	0.16
Arenoso fino	0.2	0.18	0.13

Franco arenoso fino	0.49	0.4	0.38
Franco	0.76	0.67	0.58
Arenoso franco fino	0.34	0.25	0.2
Arenoso franco	0.11	0.09	0.09
Arenoso franco muy fino	0.99	0.87	0.56
Arenoso	0.07	0.04	0.02
Franco arcillo arenoso	0.45	0.45	0.45
Franco arenoso	0.31	0.29	0.27
Franco limoso	0.92	0.85	0.83
Arcillo limoso	0.61	0.58	0.58
Franco arcillo limoso	0.79	0.72	0.67
Arenoso muy fino	1.03	0.96	0.83
Franco arenoso muy fino	0.92	0.79	0.74

Laboreo y manejo	**Secuencia de cultivos**	**C_1**
Bosque	Permanente	0.0005
Pastos	Permanente	0.005
Rotación 1/6	MCPPPP	0.011
Rotación 2/5	MSCPP	0.027
Sin cultivo protector después de soja	MS	0.0027
Arado cincel, 50% de residuos siguiendo curvas de nivel	MS	0.16
Arado cincel, pocos residuos	MS	0.35
Arado de vertedera, primavera	MS	0.35
Arado de vertedera, otoño	MS	0.39
Suelo desnudo	ninguna	1

Pendiente %	**NT**
<1	0.2
1-3	0.3
3-5	0.4
> 5	0.5

Dirección del laboreo	P_1
Igual que la pendiente	1
Curvas de nivel	0.5

L_1 y S_1 son dos factores que incluyen el efecto de la longitud de la pendiente (L) y la inclinación (S). En su forma más básica (USLE) L_1 y S_1 se combinan para representar la relación de la erosión en unas condiciones específicas y la que ocurre en condiciones estándar (22 m de largo y 9% de pendiente), y su producto se calcula como:

$$L_1S_1 = [0.065 + 0.0456\ p_t + 0.006541\ p_t^2]\ (l_t/22.1)^{NT} \quad (18.3)$$

donde p_t es la pendiente (%) del terreno, l_t es la longitud (m) y NT es un factor que depende de la pendiente (Tabla 18.1).

C_1 es el factor que refleja el efecto de la cobertura y del manejo y su interacción con la distribución de la erosividad de la lluvia durante el año. Se puede estimar a partir de tablas desarrolladas para las condiciones locales tal como se presenta en la Tabla 18.1.

Finalmente, el factor P_1 indica el efecto de varias medidas agronómicas para el control de la erosión (Tabla 18.1), tales como labrar siguiendo las curvas de nivel.

El valor calculado utilizando la ecuación 18.1 se compara con la tasa tolerable de pérdida de suelo (Tabla 18.2), es decir, con el valor máximo a partir del cual la productividad del suelo a largo plazo se ve afectada gravemente. El nivel de tolerancia varía en función del tipo y la profundidad del suelo. En general, los suelos profundos no erosionados previamente tienen una tasa tolerable de pérdida de suelo superior a la de los suelos poco profundos y/o previamente erosionados.

Tabla 18.2. Tasa tolerable de pérdida de suelo para la comparación con los valores derivados de la USLE o RUSLE.

Categoría de la erosión del suelo	Pérdida de suelo potencial (t/ha/año)
Muy baja (tolerable)	<6.7
Baja	6.7 - 11.2
Moderada	11.2 - 22.4
Alta	22.4 - 33.6
Grave	> 33.6

Ejemplo 18.1.

Vamos a calcular el promedio de erosión en una explotación en Flint, Michigan, con pendiente 5% y longitud de la pendiente 50 m. El suelo es arenoso franco fino con MO baja (1%) y el sistema de cultivo es una rotación de maíz y soja que incluye un pase de vertedera en el otoño siguiendo las curvas de nivel.

Los valores de precipitación mensuales son:

Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	12
Precipitación mm	35	32	55	75	67	81	69	89	90	55	66	53	53

La erosividad de la lluvia es por tanto:

$$R_1 = 4.17\ \Sigma(P_i^2/P)\ -152 = 136$$

En la Tabla 18.1 vemos que K_1 = 0.34 para un suelo arenoso franco fino con contenido bajo de materia orgánica y NT = 0.4 para una parcela con una pendiente del 5%. Como p_t = 5 y l_t = 50 podemos calcular el producto de L_1 y S_1 como:

$$L_1S_1 = [0.065 + 0.0456\ p_t + 0.006541\ p_t^2]\ (l_t/22.1)^{NT} = [0.065 + 0.0456 \times 5 + 0.006541 \times 5^2]\ (50/22.1)^{0.4} = 0.63$$

De acuerdo con la Tabla 18.1, P_1 = 0.5 ya que el laboreo sigue las curvas de nivel y C_1 = 0.39 pues tenemos una rotación maíz-soja con una labor de vertedera en otoño. Por lo tanto, la pérdida estimada del suelo debida a la erosión es:

$$SLE = R_1\ K_1\ L_1\ S_1\ C_1\ P_1 = 136 \times 0.34 \times 0.63 \times 0.39 \times 0.5 = 5.7\ t/ha/\ año$$

Según la Tabla 18.2, esta tasa de erosión del suelo se considera muy baja. Téngase en cuenta que para esta parcela, si el laboreo se realizara en la dirección de la pendiente, la pérdida estimada del suelo se duplicaría ya que P_1 sería 1 en lugar de 0.5, y por tanto, la pérdida de suelo estimada (11.4 t/ha/año) sería clasificada como moderada.

18.3. EL LABOREO DE CONSERVACIÓN

Como se discutió anteriormente, el laboreo convencional tiene una serie de desventajas:

a) El aumento de la infiltración debido a una labor es pasajero y para algunos tipos de suelo el laboreo favorece la formación de una costra superficial.

b) La compactación del suelo se incrementa por la formación de una suela de labor y por el tráfico frecuente de maquinaria.

c) El laboreo impide la acumulación de materia orgánica en la superficie del suelo que es necesaria para protegerlo y mejorar y estabilizar su estructura. La materia orgánica genera agentes (especialmente los polisacáridos) que promueven la cohesión de los agregados.

d) El laboreo tiene un alto coste económico y energético y promueve la emisión de gases de efecto invernadero procedentes de los suelos. El uso de combustibles fósiles también contribuye a las emisiones antropogénicas de CO_2.

e) En general, el laboreo favorece la erosión, aunque algunas operaciones podrían reducirla temporalmente.

Todos estos problemas y la aparición de nuevas tecnologías han permitido desarrollar sistemas alternativos para el manejo de los suelos agrícolas. Estos sistemas van desde la reducción del número de labores (laboreo reducido) a la completa eliminación del laboreo (siembra directa), pero no todos ellos contribuyen a la conservación del suelo. Con el fin de evitar confusiones con la terminología, el laboreo de conservación ha sido definido por ASAE (2005) como el conjunto de operaciones de laboreo (o siembra directa) que dejan residuos suficientes para cubrir el 30% de la superficie después de la siembra, y al menos 110 g/m^2 de material orgánico durante los períodos críticos de riesgo de erosión. El término Agricultura de Conservación (AC) añade un tercer componente a la perturbación mínima del suelo y al mantenimiento de los residuos: el uso de más de un cultivo en la rotación (FAO, 2016).

En comparación con el laboreo convencional, la adopción de la siembra directa puede tener más efectos negativos que positivos sobre la productividad de los cultivos (Figura 18.1). Una preocupación importante es la imposibilidad de descompactar la capa arable, particularmente cuando las pesadas sembradoras para siembra directa entran en un campo con el suelo húmedo. El suelo compactado reducirá el crecimiento del cultivo, mientras que la compactación superficial resultará en una menor infiltración y por tanto en menor acumulación de agua en el suelo; como resultado se puede producir encharcamiento e incluso la muerte de plántulas. Otra preocupación importante al adoptar la siembra directa es el aumento potencial de las malas hierbas, enfermedades y plagas. La adopción de la siembra directa requiere un control de malas hierbas muy riguroso y un aumento del uso de herbicidas. Por otro lado, la principal ventaja del no laboreo es la posibilidad de entrar antes en el campo para la siembra del cultivo. Esto es particularmente relevante para ajustar el cultivo a un periodo de crecimiento limitado y para intensificar la secuencia de cultivos.

La mayoría de los efectos negativos pueden ser contrarrestados mediante el mantenimiento de los residuos de cosecha sobre la superficie del suelo después de la recolección (Figura 18.1). Los residuos de los cultivos protegen el suelo del impacto directo de la lluvia y el viento, y mejoran la estabilidad estructural del suelo. La presencia de raíces en descomposición del cultivo anterior también favorece la estabilidad estructural de las capas superficiales del suelo y por lo tanto reduce la erosión. Otro efecto positivo de la presencia de residuos es el aumento de la rugosidad de la superficie, lo que implica un aumento en el agua que se retiene temporalmente en la superficie hasta que se infiltra. Dejar los residuos de cultivos tiene también efectos positivos a largo plazo (2-5 años), tales como un aumento en el contenido de materia orgánica, y en la actividad de la mesofauna del suelo (que genera macroporos) y de la flora del suelo que se ve favorecida por la reducción de las fluctuaciones de la temperatura del suelo en superficie. Todos estos procesos contribuyen a la mejora de la capacidad de infiltración. Además, el microclima favorable cerca de la superficie del suelo promueve la proliferación de la raíz que compite favorablemente con la evaporación directa desde la superficie del suelo.

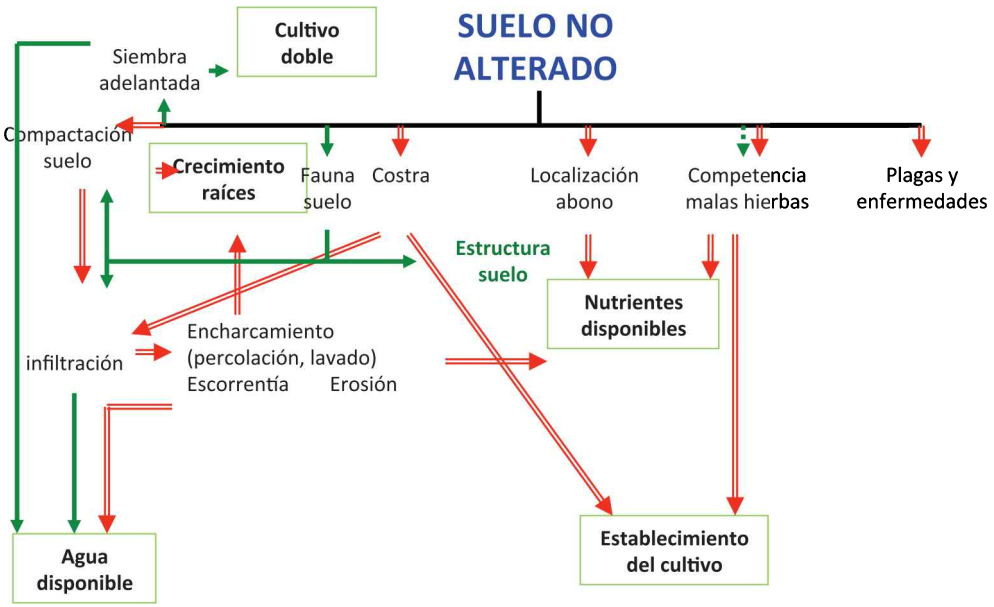


Figura 18.1. Principales vías por las que pasar de laboreo convencional a agricultura de conservación (laboreo cero, residuos en superficie y rotación de cultivos) puede afectar a los principales determinantes (resaltados en cajas verdes) del rendimiento de los cultivos. Las flechas sencillas (de color verde oscuro) y las flechas dobles (de color rojo) indican efectos positivos (beneficiosos) y negativos (limitantes), respectivamente, en los determinantes del rendimiento al adoptar los tres elementos de la AC. Las líneas de puntos indican un efecto beneficioso sólo esperado en el largo plazo. Adaptado de Brouder y Gómez-Macpherson (2014)

El efecto de la presencia de residuos en la evaporación desde la superficie del suelo depende de la frecuencia de las precipitaciones. Si son frecuentes, el suelo se mantiene en primera fase de evaporación, de manera que los residuos reducirán la evaporación en proporción a la radiación que interceptan. Sin embargo, si la lluvia es poco frecuente, el suelo permanece en fase 2 (limitado por la conductividad hidráulica) de modo que la presencia de residuos tiene poco efecto sobre la evaporación. En resumen, si la cantidad de residuos es suficiente para cubrir el suelo, se espera que el balance de agua mejore al aumentar la infiltración y, en menor medida, al reducirse la evaporación. De hecho, la AC ha tenido resultados más positivos en términos de incremento de rendimiento (con respecto a los sistemas convencionales de laboreo) en los sistemas de secano de zonas semiáridas que en otros ambientes donde el agua no es limitante.

El mantenimiento de los residuos también puede tener efectos negativos a corto plazo sobre el crecimiento de las plantas (Figura 18.1). En la fase inicial de la adopción de siembra directa con residuos, la presencia de éstos en gran cantidad puede dar lugar a la inmovilización de N (Capítulo 24), y al requerimiento de mayores cantidades de fertilizante nitrogenado para compensar esta inmovilización hasta que la fertilidad del suelo se incremente y el sistema quede equilibrado. Además, los nu-

trientes no móviles del suelo, como el fósforo, no pueden ser incorporados en el suelo a menos que el fertilizante se coloque junto a las semillas durante la siembra. Los residuos también reducen la absorción de radiación por el suelo y su calentamiento durante el establecimiento de los cultivos al inicio de primavera cuando las temperaturas son bajas; por otro lado, en los trópicos, las temperaturas más bajas del suelo cubierto por residuos pueden beneficiar el ciclo de los nutrientes y el crecimiento de la planta. La presencia de residuos sobre el suelo requiere de sembradoras especiales para sembrar a través de ellos, y hace más difícil la aplicación de herbicidas y el riego por surcos o inundación.

En la agricultura de conservación, la rotación de cultivos tiene la función de facilitar el control de malas hierbas y reducir el riesgo de incidencia de plagas y enfermedades (figura 18.1), en particular las del suelo. Por ejemplo, se observó una mayor incidencia de enfermedades causadas por hongos de suelo en sistemas de monocultivo de trigo en no laboreo en Australia, pero se controló cuando se incluyó colza en la rotación. La rotación también puede ayudar a conseguir la cantidad óptima de residuos en el sistema mediante la combinación de cultivos de alta y baja producción de residuos. El valor de la adopción de una rotación en la agricultura de conservación puede ser evidente sólo a largo plazo.

Los sistemas agrícolas pueden responder de forma diferente a los sistemas de laboreo. En un meta-análisis se encontró que la siembra directa reduce el rendimiento del cultivo en comparación con los sistemas de laboreo convencional, pero que estos efectos negativos disminuyen si se mantienen los residuos. Mientras que la AC ha sido ampliamente adoptada en América del Norte y del Sur, hasta ahora se ha extendido poco en Europa (excepto en cubiertas herbáceas para plantaciones). Las razones que limitan adopción de la AC en el norte y centro de Europa incluyen problemas técnicos con el establecimiento del cultivo en suelos fríos y húmedos, el alto contenido de materia orgánica natural de muchos suelos, la topografía plana y el bajo riesgo de erosión, los problemas de gestión de residuos de cultivos y el control de malas hierbas.

Ejemplo 18.1.

Un sistema intermedio de laboreo de conservación *(laboreo reducido,* también llamado *laboreo mínimo)* para la rotación trigo-girasol incluye el laboreo vertical, a menudo con arado de cincel y puede también causar problemas de erosión graves (Figura 18.2):

- El girasol se siembra directamente en el rastrojo de trigo usando una sembradora especial para siembra directa. Las malas hierbas se controlan con dos aplicaciones de herbicida (glifosato) y un herbicida residual aplicado antes de la siembra.
- Los residuos de girasol se trocean con grada de discos (2 pases cruzados) o son quemados. A continuación, se aplica herbicida o se pasa un cultivador antes de la siembra de trigo.

En este sistema sería difícil de evitar por completo el laboreo, a no ser que se utilice una sembradora de siembra directa para cereales y para girasol, pero en cualquier caso se mejora la protección del suelo y se reducen los costes en comparación con el laboreo tradicional. Sin embargo, puede ser necesaria una labor para romper las capas compactadas profundas, lo que se puede hacer mediante subsolador cada 4-8 años. En la recolección, será conveniente cortar el cereal lo más alto posible y tener un sistema de picado y distribución de la paja en la cosechadora para evitar problemas durante la siembra. Estos sistemas en los que los residuos se distribuyen simultáneamente a la cosecha pueden favorecer la dispersión de las malas hierbas en el campo, ya que las semillas de malas hierbas se distribuyen junto con los residuos de cosecha (Capítulo 30).

Figura 18.2. Ejemplo de erosión severa en surcos después de labrar con arado de cincel. Foto realizada por Juan José Pérez.

En ambientes húmedos algunos cultivos forrajeros con semillas muy pequeñas, como la alfalfa se pueden sembrar sin enterrar la semilla, que se distribuye al azar sobre residuos del cultivo anterior o durante el cultivo anterior, quedando por tanto protegida. Si las condiciones ambientales son adecuadas (lluvias frecuentes, baja demanda evaporativa) se consigue un establecimiento aceptable.

La transición de laboreo convencional a laboreo de conservación debe ser un proceso gradual y será necesario realizar ajustes para resolver los problemas específicos

de los suelos, de los cultivos y de las técnicas a adoptar. Por ejemplo, el no laboreo tiene menos problemas de adaptación a suelos de textura media o ligera a causa de su menor riesgo de compactación. En suelos arcillosos pesados el no laboreo puede agravar la compactación del suelo y las reducciones del rendimiento que causa. Por otra parte el funcionamiento de las sembradoras para siembra directa es generalmente peor en suelos pesados, ya que los surcos de siembra pueden quedar ligeramente abiertos no siendo bueno el contacto semilla-suelo. Estos problemas se pueden resolver, en parte, mediante cambios en los elementos de la sembradora. Por ejemplo, se pueden agregar varias cuchillas que cortan y retirar la tierra en una sección de 10 x 10 cm en la parte delantera de la bota de siembra, lo que favorece el contacto semilla-suelo o usando un cultivador con rejas espaciadas a la misma distancia que las botas de la sembradora. Este procedimiento ha sido denominado *laboreo en bandas,* y permite la aplicación localizada de fertilizantes de P y K y promueve el calentamiento del suelo en las hileras.

En *el laboreo en caballones* o *cultivo en camas permanentes* (Fig. 18.3), el suelo se deja en reposo desde la cosecha hasta la siembra, excepto para la inyección de nutrientes. Las camas o los caballones se reforman cada año en el mismo sitio. La siembra se realiza en un lecho de siembra preparado en las crestas de los caballones, con distintos elementos que barren o cortan los residuos, abren los surcos, cortan la superficie, etc. Los residuos se dejan en los surcos entre los caballones. El control de malas hierbas se realiza con herbicidas y/o labores muy ligeras. Las camas, sobre las que se siembran las hileras de plantas, tienen la ventaja de un secado más rápido y un calentamiento más rápido en primavera.

Figura 18.3. Laboreo en caballones permanentes: siembra directa de maíz sobre restrojo de algodón.

18.4. SISTEMAS DE CONSERVACIÓN DEL SUELO EN PLANTACIONES FRUTALES Y VIÑEDOS

En cultivos leñosos los objetivos del manejo del suelo son diferentes a los de los cultivos herbáceos, ya que no se requiere para preparar la siembra. Tradicionalmente, el laboreo en cultivos leñosos tenía como objetivo la eliminación de las malas hierbas y la mejora del balance de agua. La amplia disponibilidad de herbicidas o desbrozadoras para controlar las malas hierbas permite restringir el laboreo asegurando un balance de agua adecuado y el control de la erosión.

Las opciones de manejo de suelos utilizadas en frutales son numerosas, pero podemos destacar las siguientes:

- El laboreo convencional mantiene el suelo desnudo mediante laboreo superficial periódico (cultivador, grada de discos) para aumentar la infiltración y controlar las malas hierbas. Es el sistema utilizado tradicionalmente y sigue estando muy extendido en plantaciones de secano (olivos, almendros, viñedos). Este sistema genera problemas de compactación, mantiene baja la materia orgánica del suelo y aumenta el riesgo de erosión.

- En el laboreo mínimo, las malas hierbas son controladas por herbicidas y las operaciones de laboreo se limitan a un pase de cultivador en verano-otoño para mejorar la infiltración.

- En el no laboreo con suelo desnudo, el suelo se mantiene sin hierbas usando herbicidas pero el efecto a largo plazo es una reducción en la infiltración debido al tráfico inevitable (aplicación de herbicidas y fertilizantes, recolección). Para los sistemas de secano la menor infiltración por lo general implica un empeoramiento del balance de agua y una reducción en el rendimiento. En las zonas en pendiente el no laboreo favorece la erosión en cárcavas debido a las altas tasas de escorrentía.

- La cubierta herbácea permanente implica un cultivo herbáceo que se siembra y se siega periódicamente cuando es necesario. Este sistema no es aconsejable en condiciones limitantes de agua debido a la competencia por el agua entre la cubierta y los árboles.

- Cubiertas herbáceas temporales: los problemas de erosión en plantaciones han obligado a la búsqueda de alternativas viables de manejo del suelo en zonas de secano o donde la disponibilidad de agua de riego es limitada. En estos casos las cubiertas herbáceas permanentes no son factibles, ya que aumentan la ET y reducen la disponibilidad de agua para los árboles. En estos casos, se puede usar una cubierta temporal. Dependiendo de las condiciones de la finca, la cubierta puede ser sembrada o generada por la comunidad de malas hierbas. En condiciones mediterráneas la cubierta se establece en el otoño, antes de la temporada de lluvias, pero se elimina a principios de la primavera para evitar la competencia por el agua durante la primavera y el verano. Esto se puede hacer con herbicidas o por siega, de forma que los residuos sirven como acolchado hasta el otoño. Por lo general, la siega se realiza más de una vez durante la temporada dependiendo de los patrones

de lluvia. Las cubiertas pueden ocupar todo el suelo bajo los árboles o sólo parte del mismo (cubierta en fajas). El principal problema con las cubiertas temporales es decidir cuándo eliminarlas, ya que si lo hacemos tarde habrá una reducción del agua disponible para los árboles, y por lo tanto una pérdida en el rendimiento, mientras que una eliminación temprana resultará en menor protección del suelo y un aumento del riesgo de erosión. Si se usan cultivos anuales como cubiertas habrá que sembrar todos los años, aunque se han desarrollado alternativas usando especies perennes. La Figura 18.4 muestra la evaporación acumulada desde el suelo desnudo o de una cubierta de hierba bajo un olivar establecida en el otoño (15 de octubre de 2010). En este ejemplo la hierba por debajo de los olivos no evapora más agua que el suelo desnudo, hasta mediados de marzo. El 1 de abril, el incremento de agua perdida debido a la cubierta es de 9 mm. El 1 de mayo es de 37 mm. La fecha apropiada para eliminar la cubierta estaría alrededor del momento en que las dos curvas empiezan a divergir. Por desgracia, para una plantación concreta esta fecha varía según las condiciones de cada año, es decir, en años secos la competencia entre la cubierta y los árboles comenzaría mucho antes. La fecha también varía dependiendo del espacio entre los árboles y su tamaño, el tipo de suelo y la profundidad de las raíces, y las especies de la cubierta y el área que ocupan bajo los árboles. Una combinación de experimentos y modelización se está llevando a cabo en diferentes países para reducir esta incertidumbre.

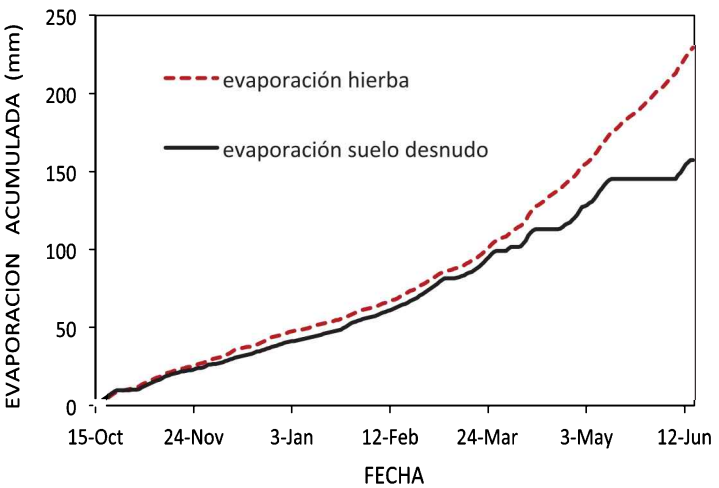


Figura 18.4. Evaporación desde suelo desnudo o transpiración de cubierta de hierbas debajo de un olivar con 50% de cobertura en el sur de España. La cubierta de hierba se estableció el 15 de octubre de 2010.

18.5. EL TRÁFICO CONTROLADO

El laboreo de conservación puede dar lugar a la compactación del suelo, sobre todo con el uso de sembradoras pesadas o cosechadoras en suelos húmedos. La introducción del tráfico controlado puede reducir este problema. El tráfico controlado

implica que el tráfico está restringido a las mismas entrelíneas todo el tiempo de forma que las ruedas del tractor pisan siempre las mismas zonas del campo durante las operaciones, mientras que las plantas se cultivan en la zona entre estos carriles de circulación. Este enfoque se ha visto facilitado con la disponibilidad de sistemas GPS para la maquinaria. Los anchos de trabajo de los equipos normalmente disponibles dictan la anchura de la zona sin tráfico. La adopción de tráfico controlado combinado con el laboreo de conservación puede aumentar la infiltración del suelo y reducir la erosión (Fig. 18.5), aumentar el contenido de agua en el suelo, y las ganancias y rendimientos de los cultivos agrícolas. Sin embargo, puede ser necesario algún pase de subsolador para descompactar los carriles de circulación.

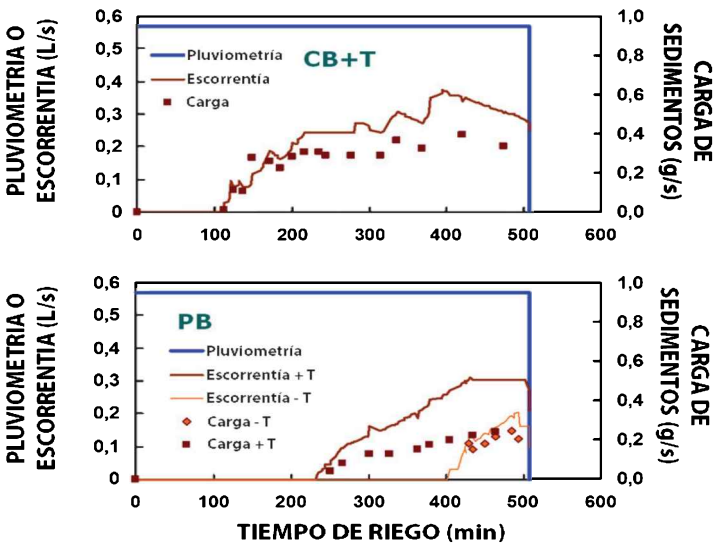


Figura 18.5. Evolución temporal de la escorrentía y la velocidad de carga de sedimentos en el agua de escorrentía durante las simulaciones de lluvia en un sistema de camas convencional (CB) y un sistema de camas permanentes (PB), con (+ T) y sin tráfico (-T) controlado.

Ejemplo 18.1.

En el sur de España, un sistema de siembra en caballones combinado con el tráfico controlado se ha desarrollado con éxito para hacer frente a la compactación del suelo y los residuos excesivos producidos por una rotación maíz-algodón bajo riego. El riego se aplica a partir de un pivote central, pero se formaron camas para facilitar el tráfico controlado y los residuos se ubican en los surcos en lugar de en las camas, donde se siembran los cultivos. El riego aplicado se redujo en un 17% desde la introducción del sistema, sin pérdida de rendimiento, pero, lo más importante para el agricultor, también se redujeron los costes.

BIBLIOGRAFÍA

Bergsma A (1981) Indices of rain erosivity. A review.ITC Journal 4:460 – 483.

Brouder S, Gómez-Macpherson H (2014) The impact of conservation agriculture on smallholder agricultural yields: A scoping review of the evidence. Agriculture, Ecosystems and Environment, 187, 11-32

FAO (2016) Basic Principles of Conservation Agriculture.Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy http://www.fao.org/ag/ca.html

Renard KG, Foster GR, Weesies GA, McCool DK, Yoder DC (1997) Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). US Dep Agric, Agric Handbook. No 703. Washington DC

Capítulo 19

Los sistemas de riego

L. MATEOS

RESUMEN:

Los métodos de riego se clasifican en riego por superficie, riego por aspersión y riego localizado (goteo/micro-riego). El riego por superficie utiliza la gravedad: el agua se distribuye por el campo conforme se infiltra. Con el riego por aspersión, el agua se distribuye a través del campo mediante tuberías presurizadas y se rocía sobre el suelo desde boquillas. Los sistemas de riego por goteo/micro-riego se conciben para localizar la aplicación de agua en determinados puntos del campo y hacerlo con frecuencia. Los factores que se deben considerar al seleccionar un método de riego son: objetivos del proyecto (maximizar el beneficio económico, reducir al mínimo los costes de inversión, la conservación del agua y de su calidad), las condiciones institucionales y sociales del lugar (financiación, disponibilidad de mano de obra, durabilidad y robustez), las condiciones físicas del sitio (suelo y topografía). La evaluación del funcionamiento del riego es recomendable como parte de los procesos de mejora de la operación y para establecer criterios de diseño del sistema. Los principales indicadores del funcionamiento del riego son la eficiencia del riego, la eficiencia de la aplicación, la adecuación y la uniformidad de la distribución. Con ellos se evalúan diferentes aspectos del proceso del riego, pero tienen que ser tratados conjuntamente para una evaluación completa.

19.1. INTRODUCCIÓN

La historia del riego es paralela a la de la agricultura. El riego ha sido practicado desde hace más de 5000 años y fue esencial para las primeras civilizaciones que se desarrollaron en ambientes áridos y semiáridos, donde el riego marcó la diferencia entre la viabilidad y la no viabilidad de la agricultura. También en ambientes mediterráneos o sub-húmedos, donde la lluvia es limitada o no se distribuye uniformemente, el riego es responsable de una parte importante de la producción de los cultivos. Se estima que el 17% de las tierras cultivadas del mundo se riegan, y producen alrededor del 40% de los alimentos.

El siglo XX experimentó una rápida expansión global del riego. La superficie equipada para el riego en todo el mundo es de 308 millones de hectáreas de las cuales el 83% se regaban en torno al año 2005. Estas cifras representan un aumento de siete veces desde el principio del siglo XX. El 62% de la superficie equipada para el riego utiliza agua superficial, mientras que el 38% utiliza aguas subterráneas y sólo el 0.1% utiliza fuentes de agua no convencionales. Alrededor del 70% de la superficie de riego se encuentra en Asia y el 17% en Estados Unidos. Las mayores áreas continuas de alta concentración de riego están a lo largo de los ríos Ganges e Indo; en el Hai He, Huang He y cuenca del Yangtze en China; a lo largo del río Nilo, en Egipto y Sudán; y en la cuenca del Mississippi-Missouri en América del Norte. Las zonas de alta densidad de riego en Europa están a lo largo de los ríos Danubio y Po. Los 3.8 millones de hectáreas de tierra regada en España se concentran a lo largo de las llanuras junto a los principales ríos, en la costa Mediterránea y alrededor de acuíferos en la meseta central.

La agricultura es el sector más importante en términos de uso del agua en todo el mundo, pues usa alrededor del 70 por ciento de las extracciones de agua de los ríos y de los acuíferos y el 90% de los usos consuntivos. El desarrollo de la agricultura de riego ha incrementado los rendimientos y ha contribuido a la estabilidad de los precios agrícolas, haciendo posible alimentar a la población en crecimiento del mundo. El futuro de la agricultura en muchos países se basa en la posibilidad de mantener, mejorar y expandir la superficie regada. Sin embargo, el riego se enfrenta a la creciente competencia de los sectores doméstico e industrial conforme aumenta la presión sobre los recursos hídricos, hasta el punto de que en muchas regiones se está convirtiendo en una amenaza para el medio ambiente. Con el fin de comprender plenamente algunas de las prácticas de manejo de riego que se describen en los Capítulos 20 y 21, es esencial que el lector revise las principales características de los distintos enfoques, métodos y equipos utilizados en la agricultura de riego.

19.2. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE RIEGO

Los riegos más antiguos se realizaban derivando el agua por gravedad (a partir de corrientes naturales) o mediante elevadores de agua accionados por seres humanos, animales o por el propio flujo de agua. Los sistemas de riego en las explotaciones agrícolas recibían el agua bien directamente desde la fuente o a través de

canales que suministran una serie de explotaciones. El agua, movida por gravedad sobre la superficie del suelo, era conducida por el regante hasta las plantas cultivadas o distribuida dentro de amelgas separadas por pequeños lomos.

Los sistemas actuales de distribución de agua desde la fuente hasta las explotaciones utilizan la gravedad o están presurizados con bombas. Pueden ser colectivos o servir sólo a explotaciones individuales. Los sistemas presurizados utilizan tuberías mientras que los sistemas de gravedad utilizan principalmente canales abiertos. La fuente de suministro puede ser agua superficial, agua subterránea o ambas (uso conjunto). La aplicación de agua a los campos utiliza una gran variedad de métodos de riego superficial, de aspersión y de goteo/micro-riego.

En los sistemas de distribución colectiva, los turnos de distribución determinan cuándo recibirá agua cada agricultor, lo que afecta a las operaciones de riego en las explotaciones agrícolas y a su calidad. Los programas de distribución pueden ser a la demanda, concertados o por rotación fija. Con suministro a la demanda, el usuario decide cuándo regar, la cantidad de agua a aplicar y por cuánto tiempo. Es típico de los sistemas presurizados modernos. Con rotación fija, el caudal, la frecuencia y la duración del suministro están fijadas por la autoridad del agua o acordado dentro de la comunidad de regantes. Con un sistema de turnos concertados, el caudal, la frecuencia y/o la duración son acordados entre el agricultor y la agencia de abastecimiento de agua.

El riego puede ser aplicado a la tierra de varias maneras. La elección depende de muchos factores, incluyendo la topografía, criterios económicos, el tipo de cultivo, el tipo de suelo, la disponibilidad de agua, las prácticas agrícolas y otros. Las siguientes categorías principales de sistemas de distribución en finca cubren la mayor parte de la variación:

- riego por superficie,
- riego por aspersión,
- riego localizado (goteo/micro-riego).

Una cuarta categoría, menos común, es la del riego subsuperficial, que consiste en el mantenimiento de un nivel freático al alcance de las raíces de los cultivos.

El riego por superficie (también conocido como riego por inundación) consiste en la aplicación y distribución de agua sobre el campo por gravedad, mojando todo el suelo o la mayor parte del mismo. La característica distintiva de este método de riego es que el agua se mueve sobre el mismo medio en el que se infiltra para rellenar la zona explorada por las raíces. La velocidad de infiltración y su distribución espacial, por tanto, son controladas por las características del suelo. Esta peculiaridad hace que sea difícil aplicar pequeñas dosis de riego, por lo que el riego de superficie se aplica típicamente a intervalos de tiempo largos (de una semana a más de un mes). Aunque el área con riego de superficie está disminuyendo, es con diferencia la forma más común de riego en todo el mundo, representando alrededor del 70% de la superficie total de regadío.

El riego por aspersión consiste en la aplicación de agua de manera similar a cómo se produce la precipitación. El agua se distribuye a través del campo a través de un sistema de tuberías a presión. Después se pulveriza en el aire para mojar toda la superficie del suelo. El chorro de agua se rompe en los aspersores en pequeñas gotas que caen al suelo.

Los sistemas de goteo/micro-riego aplican el agua directamente donde la planta crece, mojando sólo una parte de la superficie del suelo o, a veces, sólo una parte de la zona explorada por las raíces. Esta es la razón por la que también se denomina riego localizado. El agua se distribuye hasta los emisores a través de tuberías de polietileno, por lo que el sistema de riego necesita ser presurizado. La aplicación de agua se realiza generalmente con bajo caudal, en pequeñas cantidades, y con alta frecuencia, para mantener un alto contenido de agua en las zonas humedecidas. El agua se puede aplicar bien por encima o por debajo de la superficie del suelo.

Tanto la aspersión como el riego por goteo se están expandiendo, alcanzando hoy en día alrededor del 20% y 5% de la superficie mundial regada, respectivamente. El cambio de riego por superficie a sistemas presurizados está siendo más rápido en países como España, donde los sistemas de superficie, aspersión y riego localizado representan en la actualidad el 31, el 22 y el 47% de la superficie total de regadío, respectivamente.

19.3. SELECCIÓN DE UN MÉTODO DE RIEGO

La selección del método de riego depende de múltiples factores físicos y socioeconómicos. Debe ser realizada por profesionales con experiencia que interactúen con el agricultor o el gerente del sistema de riego. Los factores a tener en cuenta son:

a) *Los objetivos del proyecto.* Como en la mayoría de las actividades de producción, el objetivo principal es la máxima rentabilidad económica, aunque, p.ej., si el capital es limitado, el objetivo podría ser minimizar el coste inicial. Puede haber además objetivos sociales y ambientales (conservación de la cantidad y calidad del agua) que también se deben cumplir.

b) *Las condiciones institucionales y sociales del lugar.* Las primeras incluyen aspectos legales y políticos como incentivos financieros, reglamentos de uso de la tierra o los derechos de agua que pueden ser de importancia primordial. Las condiciones sociales incluyen la disponibilidad de soporte para el mantenimiento de los equipos de riego y la disponibilidad de mano de obra cualificada. Para el riego de pequeños agricultores en los países en desarrollo, condiciones locales adicionales a tener en cuenta son: la divisibilidad (idoneidad de un método de riego para una amplia variedad de tamaños de parcela y configuraciones), las habilidades y el esfuerzo necesarios para la operación y el mantenimiento y la resistencia (durabilidad, robustez).

c) *Las condiciones físicas del sitio.* Estas condiciones pueden referirse al suministro de agua y su calidad, a las características del terreno (suelo y topografía), al sistema de cultivo, al clima y a la disponibilidad de energía.

- Agua. La fuente, cantidad, calidad, fiabilidad y horario de entrega para el suministro de agua pueden hacer que algunos métodos de riego sean preferibles o imponer limitaciones a la selección de algunos de ellos.
- La topografía y la configuración del campo. La pendiente del terreno, la irregularidad topográfica, la forma del campo y los obstáculos físicos pueden impedir la selección de algunos métodos de riego.
- Las características del suelo. La textura del suelo, la profundidad, la heterogeneidad, la infiltración, la erosividad, la salinidad, la capacidad de drenaje, y la presencia de una capa freática poco profunda tienen que ser tenidos en cuenta al seleccionar un método de riego.
- Los cultivos y las prácticas culturales. La altura del cultivo, la germinación, las enfermedades de suelo o de la parte aérea y las prácticas culturales (marco de las plantas, sistema de manejo del suelo, aplicación de fertilizantes y pesticidas, rotación de cultivos).
- Clima. La cantidad y distribución de la precipitación determinarán si se requiere riego convencional o sólo riego de apoyo (Capítulo 21), estableciendo cuál es más adecuado y económicamente viable. El viento es un factor importante cuando se considera el riego por aspersión. El riego puede ser utilizado para modificar las condiciones ambientales del cultivo: regulación de la temperatura y control de las heladas y regulación de la humedad, pero no todos los métodos ofrecen las mismas posibilidades.
- La disponibilidad de energía y su fiabilidad. Si se requiere bombeo, el suministro de energía debe ser confiable.

19.4. CALIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE RIEGO

La evaluación del funcionamiento del riego es necesaria para conocer el potencial de mejora, para la comparación de los sistemas de riego y para establecer criterios de diseño del sistema. Se han definido diversos indicadores del funcionamiento del riego. A pesar de que están relacionados, evalúan diferentes aspectos del proceso de uso del agua de riego.

El más completo de los indicadores de la calidad del riego es la eficiencia del riego, IE, que relaciona la cantidad de agua de riego que se utiliza de forma beneficiosa por el cultivo con la cantidad total (usos beneficiosos más no beneficiosos) de agua de riego que sale de los límites (salida = aplicada – incremento de almacenamiento) del sistema dentro de un intervalo de tiempo especificado:

$$IE = \frac{\text{Agua de riego usada beneficiosamente}}{\text{Agua de riego aplicada} - \Delta \text{ agua de riego almacenada}} \; x \; 100 \qquad (19.1)$$

Si al final del período de tiempo el agua contenida en el dominio espacial es la misma que al comienzo, el almacenamiento de agua de riego es igual a cero. El sistema (dominio espacial) puede ser la zona del suelo explorada por las raíces en un campo dado, toda una explotación, una zona regable o una cuenca; mientras que el dominio temporal puede ser, por ejemplo, el intervalo entre dos riegos consecutivos o toda una campaña de riego. El agua que se utiliza beneficiosamente es principalmente la evapotranspiración del cultivo (Capítulo 9), aunque también incluye las necesidades de lavado de sales (Capítulo 22), las necesidades de agua para la preparación del lecho de siembra, la germinación y el establecimiento de las plántulas y el control de la temperatura (Capítulo 28). Los usos no beneficiosos incluyen la percolación profunda en exceso de las necesidades de lavado, la escorrentía superficial, la transpiración de malas hierbas y la evaporación desde los embalses, los aspersores y el suelo humedecido. Téngase en cuenta que el término "agua de riego" excluye las precipitaciones.

La determinación de la IE es compleja, ya que requiere la cuantificación detallada de los destinos del agua que se ha aplicado anteriormente. Por lo general, la determinación de IE se realiza mediante el cálculo de un balance de agua, que la mayoría de las veces requiere supuestos para estimar los diferentes componentes.

A pesar de que conocer la IE es a menudo necesario para juzgar el funcionamiento de los sistemas de riego, la dificultad de su determinación nos lleva a la introducción de otros términos de eficiencia que se centran en algunos de los procesos de uso del agua. La eficiencia de aplicación, AE, evalúa en qué medida el agua de riego aplicada durante un único episodio satisface una determinada lámina de riego deseada:

$$AE = \frac{\text{Lámina media que contribuye al objetivo}}{\text{Lámina media aplicada}} \; x \; 100 \tag{19.2}$$

Por lo tanto, el concepto de AE evita los problemas de establecer el uso beneficioso del agua aplicada. La lámina deseada puede ser el déficit de agua del suelo en la zona radical, SWD, o alguna cantidad más pequeña. Si se requiere un exceso de agua para el lavado de sales, entonces la lámina deseada debe ser mayor que el SWD. Implícito en la definición de AE está que la lámina deseada es uniforme sobre el campo. Si la lámina deseada es igual a la suma de los usos beneficiosos esperados, se deduce que AE proporciona una estimación de IE potencial. Por lo tanto, AE será típicamente mayor que IE. Por otra parte, una alta AE no siempre implica una alta IE, por ejemplo, si el riego se lleva a cabo al final del ciclo del cultivo.

Es fácil alcanzar una alta AE en un campo si se riega por debajo de las necesidades. Por lo tanto, la AE debe complementarse con un indicador del grado en que se satisface la lámina deseada. Este indicador es la adecuación del riego, AD, que se puede definir como la fracción del campo que recibe por lo menos la lámina deseada de agua y que toma valores entre 0 y 1. Otra expresión para la adecuación es la denominada adecuación del cuarto más bajo, AD_{lq}, definida como:

$$AD_{lq} = \frac{I_{lq}}{I_t} x\ 100 \tag{19.3}$$

donde I_{lq} es la lámina media de riego en el cuarto del área del campo que recibe menos agua y I_t es la lámina deseada. Si se utiliza como criterio de programación del riego satisfacer I_{lq}, entonces el objetivo es AD_{lq} = 1.0, lo que significa que cerca de 1/8 de la superficie del campo permanecerá bajo riego deficitario. Adoptar AD_{lq} <1.0 implica regar por defecto mientras que AD_{lq} >1.0 implica regar por exceso.

AD y AD_{lq} pueden ser evaluados representando la distribución de la lámina aplicada en el campo (Figura 19.1). La curva se construye mediante la ordenación de las medidas de lámina aplicada en orden descendente, teniendo en cuenta el área del campo que corresponde a cada medida. El punto donde la curva cruza la línea de lámina deseada indica la fracción del campo que está siendo regada de manera adecuada.

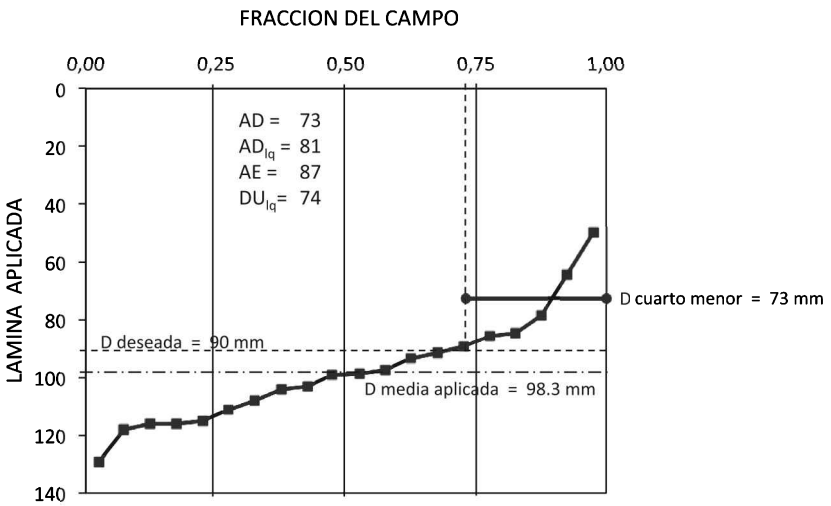


Figura 19.1. Distribución de la lámina de agua aplicada en una parcela. La distribución se ordena de mayor a menor lámina en toda el área del campo expresada como fracción del área total. Las líneas horizontales representan la lámina media aplicada, la lámina deseada y la lámina del cuarto menor (I_{lq}).

La Figura 19.1 también revela la importancia de la uniformidad de la aplicación de agua. Una distribución no uniforme puede privar a zonas de la parcela del agua necesaria y por el contrario añadir un exceso de riego en otras zonas. La uniformidad de la distribución, DU_{lq}, es un indicador de la uniformidad del riego:

$$DU_{lq} = \frac{I_{lq}}{I_{avg}} x\ 100 \tag{19.4}$$

donde I_{lq} ya ha sido definida y I_{avg} es la lámina media aplicada. La DU_{lq} puede calcularse utilizando la distribución de láminas aplicadas como se muestra en la Figura 19.1.

La determinación de la distribución del agua aplicada con riego localizado se basa en medidas de la cantidad de agua aplicada al suelo por cada emisor sobre una muestra definida de emisores. En las evaluaciones de riego por aspersión, el agua aplicada se muestrea en los nudos de una cuadrícula definida usando pluviómetros generalmente colocados encima del cultivo. En la evaluación del riego por surcos, el agua aplicada se mide solamente en la entrada del surco, y la distribución de agua se deriva típicamente de mediciones del tiempo de infiltración por medio de una función de infiltración.

19.5. DISEÑO Y MANEJO DE SISTEMAS DE RIEGO

19.5.1. El riego por superficie

El proceso del riego por superficie sigue cuatro fases (Figura 19.2), aunque no siempre ocurren todas ellas. El agua que se aplica a un extremo del campo (el alto punto más alto si el campo no está nivelado) avanza sobre el suelo hasta que se extiende por toda la superficie o a lo largo de todo el surco. Esta es la fase de avance. Entonces, si el campo está abierto en su extremo de cola, el agua comien-

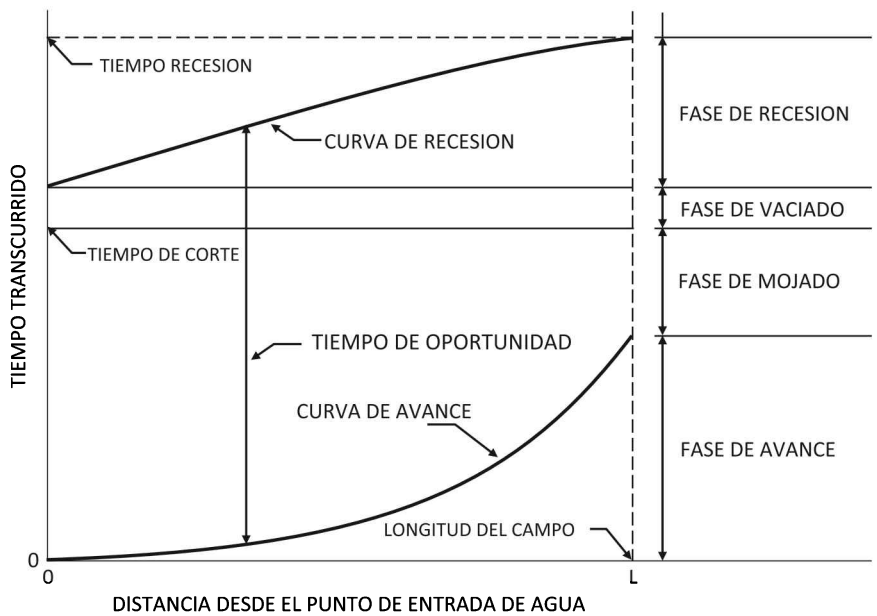


Figura 19.2. Trayectorias de avance y receso del frente de avance del agua en el riego de superficie, indicando (a la derecha) las fases de un episodio de riego.

za a escurrir fuera del campo; por el contrario, si está cerrado por un dique o un lomo, el agua comienza a almacenarse en la superficie. El intervalo entre el final de la fase de avance y el momento de corte del riego es la fase de mojado. Después de que se corta el riego, el agua en la superficie comienza a disminuir, infiltrándose en el suelo y drenando y escurriendo si el campo está abierto en cola. Dos fases se distinguen durante el período de drenaje: la fase de agotamiento (o receso vertical) y la fase de receso (receso horizontal). La fase de agotamiento se extiende desde el corte del riego hasta la aparición del primer suelo desnudo sin agua; la fase de receso comienza entonces y termina cuando la superficie queda completamente sin agua

El tiempo de oportunidad de infiltración es la diferencia entre los tiempos de receso y de avance, por lo que puede calcularse fácilmente a partir de las trayectorias de avance y receso (Figura 19.2). La velocidad de infiltración disminuye rápidamente al comienzo del riego para alcanzar más tarde una velocidad constante. Por lo tanto, la variación de agua infiltrada a través del campo es menor que la variación del tiempo de oportunidad.

El riego por surcos es el método más común de riego superficial. Los surcos son pequeños canales formados en el suelo por medio de un aporcador. Este método de riego evita el mojado de toda la superficie del campo; el agua se infiltra sólo a través del perímetro mojado. Los surcos pueden estar al mismo nivel, siguiendo la curva de nivel con una ligera pendiente o siguiendo la pendiente del terreno. El caudal en cada surco se controla de forma independiente, utilizando sifones, tuberías con pequeñas compuertas o tuberías perforadas. Por lo tanto, el riego por surcos se puede utilizar con una amplia gama de caudales mediante el ajuste del número de surcos que riegan simultáneamente. La longitud del surco y el caudal de entrada deben ser regulados para que el agua fluya hacia el final del surco rápidamente, pero sin provocar erosión. Esto asegurará una buena uniformidad de la infiltración, aunque el flujo de cola puede ser demasiado alto y por lo tanto la escorrentía puede ser excesiva. La uniformidad de la infiltración y la eficiencia de aplicación se pueden mejorar de forma simultánea mediante el uso de un alto caudal de entrada, hasta que se complete la fase de avance, y reduciendo el caudal después. Otra forma de mejorar la uniformidad de infiltración es el riego por pulsos: en lugar de aplicar un caudal continuo, el caudal se aplica intermitentemente. Con la aplicación intermitente se consigue un sellado parcial de la superficie del suelo, lo que reduce la infiltración y aumenta la velocidad de avance en los pulsos sucesivos.

El riego de tablares requiere la construcción de pequeños diques de tierra para separar los canteros explanados, típicamente de 5 a 15 m de ancho. El agua se libera sobre los canteros a través de una entrada situada cerca del centro de su parte superior. La pendiente de los canteros debe ser próxima a cero, por lo que el agua se mueve lentamente a lo largo del cantero. Toda la superficie de los canteros queda inundada. Una variación de los sistemas de riego por canteros es canteros a nivel, que son perfectamente horizontales y rodeados de diques, lo que significa que toda el agua se infiltra en el suelo y no hay escorrentía.

19.5.2. Riego por aspersión

Todos los sistemas de riego a presión deben aplicar agua a una velocidad por debajo de la capacidad de infiltración del suelo, evitando así la escorrentía. Por lo tanto, aquí el sistema de riego controla la velocidad de infiltración del agua de riego, mientras que con riego por superficie el mismo suelo controla la velocidad de infiltración durante el riego. Con el riego por aspersión, el agua se distribuye a través del campo a través de tuberías a presión y se rocía sobre el suelo utilizando boquillas. Los dispositivos para aspersión de uso agrícola generalmente se dividen en dos grandes categorías: los aspersores de cabeza rotatoria y los aspersores difusores. Los aspersores de cabeza rotatoria se mueven en un círculo impulsados por diferentes mecanismos. En el caso de los aspersores de impacto, este mecanismo es un brazo de impacto. La cabeza del aspersor pivota sobre un cojinete conforme el brazo de impacto, empujado por un muelle, golpea repetidamente el chorro de agua. Cuando el brazo impacta contra el chorro de agua, esta se dispersa mojando la zona alrededor del aspersor. Los aspersores de impacto pueden ser diseñados para girar en un círculo completo o sólo parcial. Pueden tener una o dos boquillas y muchos tamaños, lo que permite caudales de 2-280 L/min y alcances de 7 a 30 m, con presiones de operación entre 140 y 690 kPa.

Los aspersores difusores y "spinner" operan típicamente a una presión inferior a 200 kPa. El chorro de agua desde una boquilla incide sobre una placa que desvía el agua en todas las direcciones. La placa puede ser lisa o dentada y puede ser plana, cóncava o convexa, produciendo diferentes patrones de distribución de agua. Así, una placa lisa genera pequeñas gotas mientras que las placas dentadas crean pequeños chorros con tamaños de gotas más grandes. El alcance típico de aspersores de pulverización está en el intervalo de 2.5 a 5 m.

Los aspersores con placa de rotación, comúnmente conocidos como rotadores, tienen características de los aspersores de impacto y de los de pulverización. La descarga de agua desde la boquilla incide sobre una placa circular que gira, sin la necesidad de un brazo de impacto. La forma y configuración de la placa determina las múltiples trayectorias del agua y su patrón de distribución. El alcance puede llegar hasta 15 m. Los rotadores generalmente funcionan a presión inferior que los aspersores de impacto (100-345 kPa) y pueden aplicar caudales más bajos sin comprometer el buen funcionamiento.

Los aspersores se separan para conseguir una aplicación relativamente uniforme de agua sobre el campo regado haciendo una serie de posturas o con un sistema de movimiento continuo. Hay varios tipos de sistemas de aspersión. Los más comunes se describen a continuación.

- Los sistemas portátiles con cambio manual consisten en una o más tuberías (laterales) con aspersores montados en porta-aspersores verticales conectados a los laterales a distancias regulares. La altura de los porta-aspersores se adapta a la altura del cultivo. Cuando se termina de aplicar la cantidad deseada de agua en la zona cubierta por el conjunto de laterales, las tuberías se desacoplan y se llevan a la siguiente posición (postura). Esta operación se repite has-

ta completar el riego de todo el campo. La uniformidad de distribución puede ser mejorada mediante el uso de posturas alternas: en la mitad de los ciclos de riego se colocan las tuberías en posiciones intermedias. La mayoría de los sistemas portátiles con cambio manual llevan aspersores de impacto, pero también se utilizan aspersores giratorios con placa de pulverización. Este sistema se adapta a todas las topografías, suelos y cultivos, a pesar de que mover los laterales en cultivos altos como el maíz es un trabajo arduo. Las variaciones de los sistemas portátiles con cambio manual son el lateral con ruedas y los sistemas de movimiento lateral. En el primero, la tubería está montada sobre ruedas y actúa como eje, siendo impulsada por un motor que mueve todo el lateral de una posición a otra. En los sistemas de movimiento lateral la tubería es sostenida por un bastidor sobre ruedas.

- Los sistemas estacionarios o de cobertura completa son similares a los sistemas portátiles, excepto que tanto la línea principal como los laterales se mantienen en su lugar de forma permanente (si están enterrados) o sólo durante la campaña de riego. Los aspersores giratorios de placa de pulverización se están convirtiendo en el tipo de aspersor más utilizado para los sistemas estacionarios. Los sistemas estacionarios se adaptan bien a los cultivos que requieren la aplicación frecuente de agua, para facilitar la germinación y para la protección contra las heladas. En comparación con los sistemas portátiles, los sistemas estacionarios requieren una alta inversión inicial, pero necesitan poca mano de obra para su operación.

- El sistema de pivote central consta de un solo lateral apoyado sobre torres con ruedas que son autopropulsadas, normalmente con motores eléctricos, por lo que todo el lateral gira alrededor del punto de pivote en el centro de la superficie regada. El agua se suministra también en el punto de pivote. Para laterales largos (p.ej., 400 m) el período de rotación puede variar entre 12 y 120 horas, aunque 12 horas cada 3 días es más común, aplicando entre 10 y 25 mm por ciclo. Dado que los segmentos laterales externos riegan una corona de mayor área que los segmentos interiores, la intensidad de aplicación debe aumentar desde el punto de pivote hasta el extremo distal con el fin de aplicar una lámina uniforme de agua. Esto puede generar escorrentía y erosión en algunos suelos si el sistema no está diseñado y gestionado adecuadamente. Los aspersores utilizados en pivotes centrales pueden ser de cualquier tipo, pero la tendencia es hacia los aspersores de baja presión. Los sistemas de pivote central pueden adaptarse a la mayoría de los cultivos y topografías. Pueden ser inadecuados para campos pequeños o para formas de parcela donde las geometrías circulares no encajen bien. Por otra parte, los campos deben estar libres de obstáculos. Se han desarrollado soluciones diversas para superar obstáculos, y la instalación de cañones distales (grandes aspersores al final del lateral) y los sistemas de esquina (un brazo adicional que se abre en las esquinas y se pliega en los bordes) permite regar parte de las esquinas de campos cuadrados que no se regarían con un pivote central convencional. Los pivotes centrales se pueden utilizar para el riego con aplicación variable ajustada localmente mediante el uso de válvulas de solenoide que regulan la intensidad de lluvia de cada aspersor.

- Los sistemas de desplazamiento lineal son similares a los pivotes centrales excepto en que no giran, sino que se trasladan (se mueven lateralmente). El agua se suministra mediante un tubo flexible o una zanja abierta en paralelo a la dirección de traslación. Contrariamente a los pivotes, este sistema se adapta bien a los campos rectangulares y aplica el agua con intensidad uniforme en todo el campo, pudiendo usar todo tipo de aspersores. Sin embargo, la tendencia es utilizar mangueras instaladas a distancias cortas a lo largo del lateral y conectadas a emisores colocados a poca altura (LESA) o emisores de precisión y bajo requerimiento de energía (LEPA). Los sistemas LESA utilizan difusores situados cerca de la parte superior de la cubierta, mientras que los sistemas LEPA utilizan boquillas de baja presión ubicadas muy cerca de la superficie del suelo. El suelo se asurca y los surcos se bloquean a intervalos regulares para evitar la escorrentía y mejorar la uniformidad de la infiltración.

19.5.3. Riego por goteo y micro-riego

Los sistemas de riego por goteo/micro-riego están diseñados para localizar el agua sólo en partes de la superficie del suelo y aplicarla con frecuencia. Los emisores de agua pueden ser microtubos, orificios, boquillas o tubos perforados. Las aplicaciones se pueden realizar desde cada día hasta varias veces por semana, pero a veces (en suelos arenosos) las necesidades diarias se aplican en varios pulsos durante todo el día. Los sistemas pueden estar ubicados sobre o bajo la superficie del suelo y son permanentes. El riego por goteo subterráneo (SDI, siglas en inglés) es relativamente nuevo. Los laterales se instalan normalmente a 0.3-0.6 m de profundidad. Este sistema facilita el tráfico y el laboreo, reduce la germinación de malas hierbas y minimiza la evaporación desde el suelo, pero puede tener problemas por intrusión de raíces en los emisores y la dificultad para detectar fallos en el sistema.

Hay muchos tipos de emisores que son capaces de suministrar agua directamente a la zona radical del cultivo. El riego por goteo generalmente se refiere a la utilización de dispositivos de emisión desde los que el agua gotea sobre el suelo: cinta de goteo, manguera con goteros externos o internos (dispositivos pequeños de plástico insertados en o incrustados en el lateral). Por contra, el término micro-riego se refiere al uso de microdifusores o microaspersores. Los microdifusores y microaspersores están conectados al lateral por medio de microtubos flexibles. El caudal de estos emisores es muy pequeño, con intervalos de 0.5-8 L/h para goteros y 20-80 L/hora para microdifusores y microaspersores.

El riego por goteo y el micro-riego se utilizan principalmente para cultivos con marcos amplios o cultivos de alto valor, tales como frutales, hortalizas y cultivos de invernadero. Los sistemas de goteo/micro-riego son distintos para cultivos permanentes, cultivos no permanentes, y cultivos de invernadero.

Los cultivos permanentes incluyen todo tipo de árboles frutales y viñedos y sus sistemas de goteo/micro-riego pueden utilizar goteros, microaspersores o microdifusores. Por ejemplo, en los suelos arenosos o para árboles con raíces poco profundas

se riega de forma más efectiva con microaspersores/microdifusores, mientras que en árboles con marco estrecho (setos) son preferibles las líneas de goteo. A veces las ramas de los árboles interfieren con los microaspersores/ microdifusores, y otras veces mojar sólo una pequeña parte del suelo previene enfermedades. En esos dos casos, los goteros también son preferibles. Sin embargo, los microaspersores/ microdifusores pueden proporcionar cierta protección contra las heladas. Los sistemas de goteo/micro-riego en cultivos permanentes tienen típicamente un lateral por hilera de plantas si la distancia entre hileras es pequeña, o dos si la distancia es grande (p.ej. 5 m). El número de emisores por árbol depende del tipo de suelo, de la distancia entre plantas y del tipo de emisor. La idea es tener suficiente volumen mojado de la zona radical, lo que depende de la precipitación anual, de la cobertura de los árboles, de la especie y del tipo de suelo. Los sistemas de goteo/micro-riego también se utilizan para cultivos no permanentes, en particular cultivos en línea de hortalizas, y también para algunos cultivos extensivos (p.ej. algodón, tomate). Después de la cosecha, se retira el sistema de riego para permitir la preparación del suelo. Los sistemas de goteo/micro-riego en cultivos en línea utilizan principalmente líneas de goteros o cinta de goteo como dispositivos de emisión. Por lo general, hay una cinta o línea de goteros por hilera de cultivo, pero a veces son necesarias dos o sólo una por cada dos hileras, dependiendo de las propiedades físicas del suelo. Las cintas de goteo duran una o dos temporadas. Las líneas de goteo duran más tiempo (7-15 ciclos de cultivo) y, si son enterradas (SDI), pueden permanecer en el campo de forma permanente. Los sistemas de goteo/micro-riego para invernaderos pueden utilizar todo tipo de emisores, dependiendo del cultivo y del sustrato empleado.

Los sistemas de goteo/micro-riego requieren agua muy limpia para evitar la obstrucción de los emisores. Los filtros son, por tanto, componentes esenciales de estos sistemas, y el filtrado se lleva la mayor parte del esfuerzo de mantenimiento y operación. El fertirriego y la aplicación de productos químicos (la aplicación de fertilizantes y pesticidas a través de los sistemas de riego) son relativamente fáciles y comunes en los sistemas de goteo/micro-riego, así como la automatización de la operación (inicio y terminación del riego en las diferentes unidades de riego del sistema).

Los sistemas de goteo/micro-riego permiten la aplicación uniforme y eficiente del agua. Se adaptan muy bien a todo tipo de topografías, tamaños y formas de campo y cultivos, y son muy fáciles de operar. Son cada vez más utilizados en la agricultura comercial a gran escala y en la agricultura en pequeña escala tanto en los países desarrollados como en desarrollo.

19.6. DRENAJE

El drenaje es necesario para evacuar el exceso de agua de riego o de lluvia y para lavar el exceso de sales. Esto asegurará una aireación adecuada de la zona radical del cultivo y prevendrá los efectos nocivos de la acumulación de sales. Cuando el drenaje natural es insuficiente, el drenaje superficial y/o subterráneo debe ser facilitado de manera artificial.

El drenaje superficial para eliminar el exceso de agua de la superficie del suelo se acelera mediante la excavación de zanjas poco profundas. Las dimensiones y la densidad de las zanjas de drenaje se calculan en función de la duración e intensidad esperada de las precipitaciones, el tipo de suelo y los cultivos.

El drenaje subterráneo se utiliza para controlar el nivel freático y para lavar las sales. Muchos proyectos de riego requieren drenajes subterráneos, que pueden ser zanjas profundas o tubos perforados enterrados. Las zanjas abiertas tienen ventajas para la eliminación de grandes volúmenes de agua. También pueden servir como colectores de los drenes subterráneos. Las principales desventajas de las zanjas de drenaje abiertas es que ocupan tierra agrícola útil, dificultan las prácticas agrícolas y tienen altos costes de mantenimiento. Los drenes de arcilla han sido ampliamente utilizados para el drenaje del subsuelo. Las unidades son por lo general de 30 a 60 cm de longitud y de 10 a 25 cm de diámetro interior. Cada vez se utiliza más tubo de plástico corrugado y perforado, disponible generalmente en diámetros de 8 a 30 cm. Los drenes de arcilla o plástico normalmente se protegen con un envoltorio (fibra sintética, arena y grava, u otro material poroso) que permite que el agua pase desde el suelo al dren sin arrastrar partículas del suelo.

La conductividad hidráulica de un suelo es una medida de su capacidad de drenaje; por lo tanto es un parámetro básico para el diseño de sistemas de drenaje. El espaciamiento apropiado de drenes es difícil de calcular, por lo que lo mejor es basarse en la experiencia de campo obtenida en condiciones similares a las de la zona a ser drenada. No obstante, se han desarrollado varias ecuaciones para estimar el espaciamiento adecuado de drenes subterráneos si la experiencia de campo disponible no es aplicable. Estos métodos tienen en cuenta factores como la permeabilidad, la profundidad de las raíces, la profundidad de los drenes, la lluvia, las prácticas de riego, la calidad del agua y la salinidad del suelo.

Los pozos con bombeo pueden servir para bajar el nivel freático y, cuando el agua subterránea es de buena calidad para el riego, para suministrar agua que complementa el suministro principal de agua de riego. Esto se conoce como uso conjunto.

19.7. REUTILIZACIÓN DEL AGUA

Cuando se riega un campo, algunas pérdidas de agua (escorrentía superficial y percolación profunda) son inevitables en la mayoría de las situaciones. Estas pérdidas retornan al sistema hidrológico en el que se enclava el campo regado, por lo que se denominan flujos de retorno. En muchos casos, los flujos de retorno pueden ser reutilizados aguas abajo, para el riego o para otros fines. Por lo tanto, la reutilización de los flujos de retorno tiende a reducir el beneficio global de la mejora de la eficiencia a escala de parcela o finca. La reutilización puede tener lugar dentro del campo (uso conjunto mencionado anteriormente), en la explotación (p.ej. mediante el reciclaje de la escorrentía), en el distrito de riego o a la escala de la cuenca hidrográfica. La reutilización de las aguas residuales urbanas tratadas es un ejemplo de la última, aunque en este caso el origen del flujo de retorno no es la agricultura.

BIBLIOGRAFÍA

Burt CM, Clemmens AJ, Bliesner RD, Merriam JL, Hardy LA (1999) Selection of irrigation methods for agriculture. ASCE On-Farm Irrigation Committee Report, ASCE, Reston, VA, USA

Hoffman GJ, Evans RG, Jensen ME, DL Martin, RL Elliot (2007) Design and Operation of Farm Irrigation Systems. ASABE, St. Joseph, MI, USA

Capítulo 20

La programación del riego mediante el balance de agua

F.J. VILLALOBOS
L. MATEOS
E. FERERES

RESUMEN:

El método más sencillo y robusto para la programación del riego, es decir, decidir las fechas y cantidades de riego, se basa en el balance de agua. El déficit de agua del suelo (SWD, lámina de agua necesaria para llevar el suelo a capacidad de campo) se calcula utilizando los datos de lluvia y ET, y se definen reglas para el cálculo de las fechas y las dosis de riego. Las reglas se basan en el déficit de agua del suelo crítico, la cantidad de agua que el cultivo puede extraer en la profundidad radical sin que ocurra estrés hídrico. El SWD crítico es el producto de la profundidad de las raíces, el agua disponible en el suelo y el agotamiento permisible. Este último depende de la demanda evaporativa cuando queremos evitar reducciones en el crecimiento expansivo. Si no es ese el caso, la mayoría de los cultivos pueden utilizar alrededor de 70% del agua almacenada en el suelo antes de que ocurra cierre estomático. En las zonas áridas podemos calcular calendarios de riego medios que son útiles para la planificación. La programación del riego de sistemas de riego de alta frecuencia es muy simple, ya que se centra en aplicar dosis de riego iguales a la ET real del cultivo desde el último riego, sin tener en cuenta el almacenamiento de agua en el suelo.

20.1. INTRODUCCIÓN

La programación del riego es un proceso mediante el cual se determina cuándo regar y cuánta agua aplicar, esto es, las fechas y las dosis de riego. Las medidas en la planta (potencial hídrico de la hoja, temperatura de la cubierta) o del estado hídrico del suelo (contenido de agua, potencial hídrico) pueden ser utilizadas para la programación de riegos, pero aquí sólo trataremos el método más simple, aunque potente, el basado en el balance de agua. Se trata de la determinación de todas las entradas y salidas de agua del campo, y se basa en el mantenimiento de un contenido de agua del suelo adecuado en términos de rendimiento del cultivo. Para utilizar este método es especialmente importante conocer la ET del cultivo con precisión.

Teniendo en cuenta las dificultades técnicas en la medición de los componentes del balance agua en la práctica, este método se aplica sobre la base de estimaciones de algunos de los componentes del balance de agua. Por tanto, es muy deseable, cuando sea posible, disponer de medidas (sonda de neutrones, muestreo gravimétrico) que nos permitan comprobar la exactitud de los valores estimados.

En este capítulo se presentan en primer lugar los fundamentos y aplicaciones del método del balance de agua. A continuación se presenta la información necesaria para la aplicación del método y las reglas para la determinación de las fechas y cantidades de riego.

20.2. LA ECUACIÓN DE BALANCE DE AGUA PARA LA PROGRAMACIÓN DEL RIEGO

La ecuación del balance hídrico permite el cálculo de la variación del contenido de agua del suelo como la diferencia entre las entradas y salidas de agua del campo. Por tanto, el Déficit de Agua del Suelo (SWD, mm) para el día de t se calcula como:

$$SWD_t = SWD_{t-1} + ET - I_e - P_e \quad (20.1)$$

donde P_e es la precipitación efectiva e I_e es el riego efectivo. En ambos casos, los valores efectivos se obtienen después de descontar las pérdidas por escorrentía o percolación profunda. El déficit de agua del suelo se define en el Capítulo 8 como la cantidad de agua necesaria para llevar el suelo hasta el límite superior (capacidad de campo). Téngase en cuenta que en lugar de considerar la cantidad de agua en el suelo, utilizamos un déficit de agua que se incrementa desde cero cuando el suelo está a capacidad de campo.

Una vez fijado un método para estimar SWD, se deben establecer reglas de decisión para determinar la fecha y la dosis de riego. La regla de decisión a adoptar depende de numerosos factores, tales como el cultivo, el suelo, el clima y el sistema de riego.

El déficit de agua del suelo (SWD_c) que, en general, no debe ser excedido, se calcula como:

$$SWD_c = Z_R \ PAW \ AD \tag{20.2}$$

donde Z_R es la profundidad radical efectiva (m), PAW (mm/m) es el agua disponible en el suelo, esto es, es la diferencia entre capacidad de campo y punto de marchitez y AD es el agotamiento permisible (fracción). Los valores aproximados de PAW para suelos arenosos, francos y arcillosos son 100, 150 y 200 mm/m, respectivamente. Un valor medio de PAW de 120 mm/m se ha encontrado para una amplia gama de los suelos de textura media y puede ser utilizado en ausencia de información local.

20.3. PROFUNDIDAD RADICAL EFECTIVA

En el contexto de la programación del riego, la profundidad radical efectiva (Z_R) es la profundidad donde las raíces pueden extraer la mayor parte del agua del suelo, y es equivalente a la reserva de agua del suelo que es manejada por el regante. Esta profundidad puede considerarse constante para cultivos perennes (alfalfa, frutales). En cultivos anuales, Z_R aumenta desde un mínimo (Z_{Rmin}) hasta un valor máximo (Z_{Rmax}) que depende del cultivo y del suelo (Tabla 20.1). La variación de Z_R para cultivos anuales se puede calcular como sigue:

$$Z_R = Z_{Rmin} + (Z_{Rmax} - Z_{Rmin}) \, R_f \tag{20.3}$$

donde Z_{Rmin} es el valor de profundidad de las raíces en la siembra, que es igual a la profundidad de siembra. El valor máximo de profundidad radical de los cultivos anuales se produce alrededor o después de la floración. El factor R_f describe la tasa de crecimiento de la profundidad de las raíces durante el ciclo y se puede calcular como una función del tiempo (t, ec. 20.4a) o como una función de tiempo térmico (TT, ec. 20.4b) desde la siembra :

$$R_f = \frac{t}{t_{s-m}} \tag{20.4a}$$

$$R_f = \frac{TT}{TT_{s-m}} \tag{20.4b}$$

donde t_{s-m} y TT_{s-m} son el tiempo y el tiempo térmico desde la siembra hasta la máxima profundidad radical, respectivamente. El factor principal que determina la máxima profundidad radical es el propio suelo, en particular su profundidad y su resistencia mecánica a la penetración de las raíces. Por lo tanto, para cualquier cultivo, la profundidad radical máxima depende de las características del suelo y eso explica la amplia variación en la profundidad máxima de cada especie que se presenta en la Tabla 20.1. Por ejemplo, la Tabla 20.1 muestra que en el caso del girasol la profundidad radical máxima varía de 1 a 2.5 m. En algunos suelos ex-

tremadamente sueltos y profundos, se ha encontrado que la extracción de agua por los cultivos de girasol se produce hasta 3 m y más de profundidad. Además, el manejo del riego afecta a la distribución del sistema radicular; el riego frecuente promueve el crecimiento de raíces en las capas superficiales, mientras que con largos intervalos entre riegos se favorece más el crecimiento de raíces en las capas más profundas. Como la resistencia mecánica del suelo aumenta exponencialmente a medida que el suelo se seca, el crecimiento de la raíz se produce muy lentamente o no se produce en absoluto en suelo seco. Esta es la razón por la que es aconsejable comenzar la campaña con un perfil de suelo completamente cargado (déficit de agua cero en la zona radical prevista). En ese caso, si se retrasa el riego, el crecimiento de la raíz se produce en capas progresivamente más profundas y húmedas debido a que la absorción de agua seca progresivamente las capas de suelo de arriba, lo que limita el crecimiento de nuevas raíces en las capas más superficiales. Por lo tanto, la distribución de las raíces es el resultado de la dinámica de absorción de agua de la raíz y de la aplicación de agua, que determinan dónde van a ser favorables las condiciones para la expansión de nuevas raíces. Esto ha llevado a la (falsa) creencia popular de que las raíces buscan el agua. Lo que hacen es proliferar donde las condiciones ambientales del suelo son buenas en términos de contenido de agua y de nutrientes y de temperatura. Por lo tanto, el manejo del riego afecta a la distribución del sistema radicular, pero no a su profundidad. El riego frecuente favorece la alta densidad de raíces en las capas superficiales, mientras que el riego infrecuente o las condiciones de secano generan sistemas radicales de menor densidad cerca de la superficie y mayor densidad en las capas profundas. Si las capas profundas del suelo están secas muy poco crecimiento radical ocurrirá allí.

Tabla 20.1. Profundidad radical efectiva máxima en ausencia de restricciones del suelo y factor para el cálculo del agotamiento permisible (F_{AD}) para especies cultivadas importantes. El amplio intervalo en profundidad de las raíces que se muestra refleja la sensibilidad de la distribución de las raíces al manejo del riego. Para obtener información sobre más especies véase el Apéndice 10.3.

Cultivo	Profundidad radical max.	F_{AD}
Alfalfa (heno)	1.0-2.0	0.09
Manzano	1.0-2.0	0.10
Cebada	1.0-1.5	0.09
Judía (Phaseolus) (seca)	0.6-0.9	0.11
Café	0.9-1.5	0.12
Algodón	1.0-1.7	0.07
Viñedo (vino)	1.0-2.0	0.11
Lechuga	0.3-0.5	0.14

Maíz (grano)	1.0-1.7	0.09
Mijo	1.0-2.0	0.09
Olivo	1.2-1.7	0.07
Naranjo	1.0-1.5	0.10
Palmera	0.7-1.1	0.07
Melocotón	1.0-2.0	0.10
Guisantes (seco)	0.6-1.0	0.12
Patata	0.4-0.6	0.13
Colza	1.0-1.5	0.08
Arroz	0.5-1.0	0.16
Sorgo (grano)	1.0-2.0	0.09
Soja	0.6-1.3	0.10
Remolacha azucarera	0.7-1.2	0.09
Caña de azúcar (virgen)	1.2-2.0	0.07
Girasol	0.8-1.5	0.11
Té	0.9-1.5	0.12
Tomate	0.7-1.5	0.12
Trigo de invierno	1.5-1.8	0.09

20.4. AGOTAMIENTO PERMISIBLE

Las plantas pueden extraer agua del suelo hasta el punto de marchitez, pero el funcionamiento del cultivo se ve afectado antes de eso. El agotamiento permisible es la fracción del agua disponible que puede ser extraída por el cultivo sin efectos negativos sobre el rendimiento. También se puede definir como la fracción del PAW por encima de la cual procesos tales como la transpiración, la asimilación o el crecimiento no se ven afectados. Por lo tanto el AD puede depender del proceso considerado y de la demanda evaporativa, ya que el estado hídrico de la planta se ve afectado por el potencial hídrico del suelo y por la tasa de transpiración (Capítulo 14). Las tasas de crecimiento expansivo se pueden ver afectadas después de agotar sólo el 10-20% del agua disponible, mientras que la transpiración se ve afectada por lo general con valores mucho más altos (60-70% del PAW). La evapotranspiración de los cultivos extensivos, de acuerdo con Ritchie, se reduce después de que se haya extraído aproximadamente 2/3 del agua disponible. Se trata de una simple regla válida cuando el crecimiento expansivo no es crítico para el rendimiento (situaciones de cobertura completa, y cuando el valor de la cosecha depende de la

materia seca que acumula). Por el contrario, cuando producimos cultivos hortícolas a menudo nos preocupa el tamaño del órgano cosechable (raíces, bulbos, hojas) por lo que el déficit de agua debe ser evitado y debe adoptarse una baja AD. Lo mismo ocurriría cuando nos ocupamos de cultivos extensivos durante el crecimiento vegetativo. En esos casos, la demanda evaporativa debe tenerse también en cuenta, de modo que AD se reduce conforme aumenta la ET_0:

$$AD = 1 - F_{AD} ET_0 \tag{20.5}$$

donde F_{AD} es un factor de sensibilidad que se muestra en la Tabla 20.1 para las principales especies agrícolas (para una lista más completa, véase el Apéndice 10.3). Si usando la ec. 20.5 se obtiene un valor de AD por debajo de 0.2, adoptamos AD = 0.2.

Ejemplo 20.1.

El suelo en la finca es de textura franco arenosa y tiene 1 m de profundidad. Queremos regar maíz (después de cobertura completa) y cebolla, y necesitamos calcular los valores de SWD crítico.

Los valores esperados de ET_0 máxima son 5 mm/d (cebolla) y 8 mm/d (maíz). De acuerdo con el tipo de suelo podemos adoptar un valor de PAW de 120 mm/m.

De acuerdo con el Apéndice 10.1 la profundidad radical máxima de la cebolla es de 0.5-0.8 m. Tomamos el valor medio (0.65 m). El valor de F_{AD} es 0.14 (Apéndice 10.1), de modo que usando la ec. 20.5 obtenemos:

$$AD = 1 - F_{AD} ET_0 = 1 - 0.14 \cdot 5 = 0.3$$

Ahora calculamos el déficit de agua del suelo crítico:

$$\mathrm{SWD_c} = \mathrm{Z_R\ PAW\ AD} = 0.65\ \mathrm{m} \times 120\ \mathrm{mm/m} \times 0.3 = 23.4\ \mathrm{mm}$$

La profundidad radical máxima del maíz es de 1-2 m que en todo caso es mayor a la profundidad real del suelo (1 m) por lo que adoptamos 1 m como profundidad máxima. Como hemos llegado a cobertura completa no nos preocupamos por la expansión y adoptamos AD = 0.7. El déficit de agua del suelo crítico será:

$$\mathrm{SWD_c} = \mathrm{Z_R\ PAW\ AD} = 1.0\ \mathrm{m} \times 120\ \mathrm{mm/m} \times 0.70 = 84\ \mathrm{mm}$$

20.5. CRITERIOS PARA LA PROGRAMACIÓN DEL RIEGO

La regla básica para la programación del riego es regar justo antes de que el déficit de agua del suelo alcance el SWD crítico definido en la ecuación 20.2, aplicando una dosis igual a SWD. Esta regla implica que no va a haber déficit de agua y que

se dará el mínimo número de riegos. Sin embargo, las características del sistema de riego pueden imponer restricciones a las fechas y a las dosis de riego.

La programación de riego por el balance de agua es equivalente a operar con una tarjeta de crédito con un crédito máximo (PAW) y un crédito crítico (SWD crítico), por encima del cual aumentan las tasas de interés (el rendimiento del cultivo disminuye). Podemos depositar dinero cada vez que queremos (regar) y algunos amigos pueden depositar de forma inesperada dinero como un regalo (lluvia). Gastamos dinero todos los días (ET) por lo que el déficit en la cuenta se incrementa. Si queremos evitar las altas tasas de interés y reducir al mínimo el número de depósitos (ya que implican un coste, la mano de obra involucrada en la aplicación de riego) deberíamos ir al banco justo antes de que el déficit alcance el valor crítico y depositar una cantidad de dinero igual al déficit. Esta sería la regla básica. Si vamos antes al banco entonces el número de depósitos se incrementaría. Si vamos más tarde vamos a superar el crédito crítico y la tasa de interés aumentaría.

20.5.1. Restricciones a las fechas de riego

Algunos sistemas de riego, por lo general los de superficie, están organizados de acuerdo a una rotación fija y los agricultores reciben agua a intervalos determinados (por ejemplo, semanalmente) por lo que las fechas posibles de riego son fijas y el agricultor decide la cantidad de riego. Los sistemas de riego presurizados pueden trabajar a la demanda por lo que el agricultor elige la fecha y la dosis. Sin embargo, incluso en este caso, las fechas pueden ser restringidas por vacaciones u otras operaciones culturales que son incompatibles con el riego (por ejemplo, aplicación de pesticidas) o requieren mano de obra o equipo necesario para el riego.

20.5.2. Restricciones a la dosis de riego

El tipo de sistema de riego y su diseño pueden imponer restricciones sobre las dosis de riego. Los sistemas de riego por gravedad están diseñados para aplicar una dosis alta por riego (más de 50-60 mm) y se vuelven muy ineficientes cuando se aplican dosis más pequeñas, excepto en los sistemas de riego de pequeños agricultores en parcelas muy pequeñas. Las máquinas de riego (pivote central, movimiento lateral, etc.) se mueven dentro de un rango de velocidades que determinan las láminas de riego que pueden aplicar. Los sistemas de aspersión con cambio manual deben ser organizados teniendo en cuenta el tiempo necesario para el cambio de postura, lo que por lo general conduce a una dosis (o duración) de riego óptima.

20.5.3. Las decisiones sobre las fechas y dosis de riego

La regla básica para decidir cuándo regar es hacerlo justo antes de que el déficit hídrico del suelo alcance el déficit crítico, que se calcula de acuerdo con el suelo y el

cultivo. Si regamos antes vamos a aumentar el número de riegos, y por lo tanto el coste, pero vamos a estar en el lado seguro en términos de déficit de agua y seríamos capaces de hacer frente a posibles fallos del sistema de riego. Si regamos más tarde, y por lo tanto SWD excede a SWD crítico, se produce estrés hídrico lo que puede tener un efecto negativo. Este sería el caso del riego deficitario, cuando el agua disponible no es suficiente para satisfacer las necesidades de agua de los cultivos. En el caso de un turno fijo de suministro de agua, para cualquier fecha en la que disponemos de agua, debemos regar si esperamos que el SWD exceda a SWD_c antes de la próxima fecha en la que habrá agua para regar.

Ejemplo 20.1.

Estamos regando maíz durante el verano con una ET media diaria de 8 mm/d. Disponemos de agua cada 10 días (1 de julio, 11 de julio, 21 de julio, etc.) y el SWD crítico es 120 mm. El 1 de julio el SWD es de 20 mm. ¿Hay que regar? La respuesta es no. Podemos esperar hasta el 11 de julio ya que entonces el SWD será 20 + 10 x 8 = 100 mm. Deberemos regar en esa fecha (11 de julio) ya que el SWD excedería el valor crítico poco después del 11 de Julio, por lo que esperar hasta el 21 de julio debe desecharse.

Una vez decidida la fecha de riego la regla básica es volver a llenar el suelo, es decir, llevar el suelo a SWD cero; por lo tanto, la dosis de riego debe ser igual al SWD en la fecha de riego. Sin embargo, la dosis del riego podría ser mayor que SWD (exceso de riego) cuando se requiere el lavado de sales. Por el contrario, la dosis podría ser menor que SWD, dejando así algo de capacidad de retención de agua en el suelo sin llenar, que podría almacenar las precipitaciones en los días después del riego. Esta estrategia puede mejorar el uso de la precipitación a expensas de aumentar el número de riegos.

Ejemplo 20.1.

Se aplican distintas estrategias para la fecha y la dosis de riego de un cultivo de sorgo sembrado el 15 de Abril en Hinojosa (España). El SWD crítico es 94 mm. La Figura 20.1 muestra la estrategia básica (regar cuando SWD igual a SWD crítico) y aplicar una dosis igual a SWD. En este caso aplicamos 3 riegos. En la Figura 20.2 se siguió una estrategia más conservadora: se riega antes de que SWD alcance el valor crítico. El número de riegos sería entonces de 4. Si adoptamos una estrategia diseñada para aprovechar las precipitaciones (no llevar el suelo a déficit cero) el número de riegos es también 4 (Fig. 20.3). En la Figura 20.4 se asume un turno fijo de riego de 10 días. El número de riegos sería 5. Tenga en cuenta que el agricultor no necesita regar cada 10 días, sino sólo en aquellos días en los que no puede esperar hasta la próxima fecha posible para el riego.

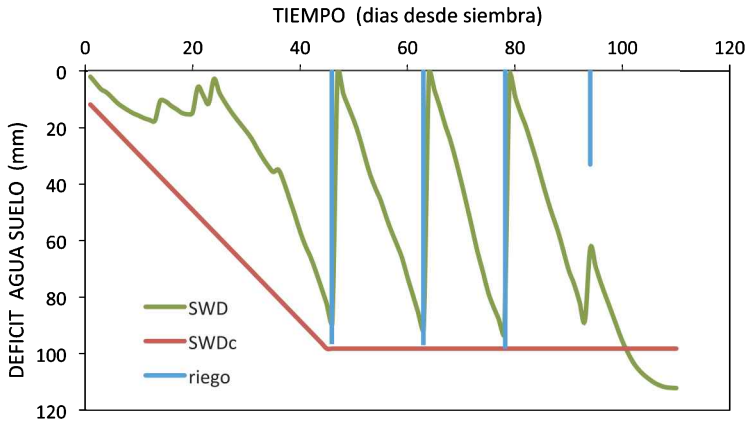


Figura 20.1. Programa de riego de sorgo sembrado el 15 de abril en Hinojosa (España). Se muestran las curvas de déficit de agua del suelo y el déficit crítico. La estrategia seguida es regar cuando SWD es igual a SWD crítico, y aplicar una dosis igual a SWD.

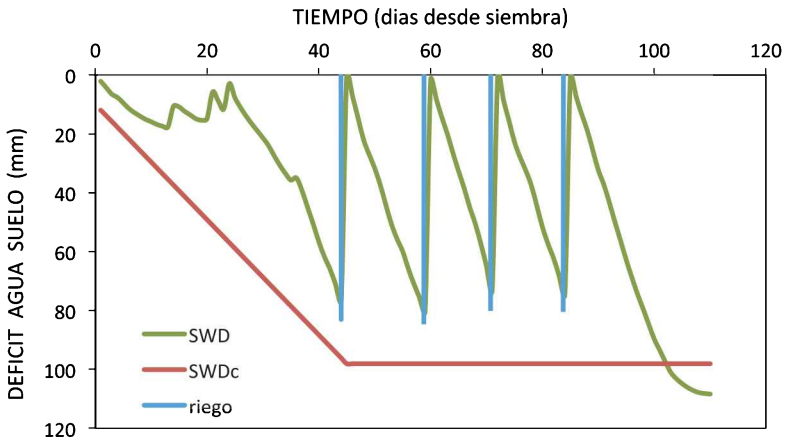


Figura 20.2. Programa de riego de sorgo sembrado el 15 de abril en Hinojosa (España). Se muestran las curvas de déficit de agua del suelo y el déficit crítico. La estrategia seguida es regar cuando SWD es igual a SWD crítico menos 20 mm, y aplicar una dosis igual a SWD.

Las reglas sobre dosis de riego tienen que ser corregidas cerca del final del ciclo de cultivo con el fin de dejar el suelo lo más seco posible para permitir el almacenamiento de lluvias durante el barbecho y para evitar la percolación profunda excesiva y, por tanto, la lixiviación de nitratos. Para lograr tal objetivo, el déficit de agua del suelo en la cosecha debe acercarse a un 80-90% del agua disponible en el perfil. Esto se puede lograr mediante la resolución de la ecuación de balance de agua des-

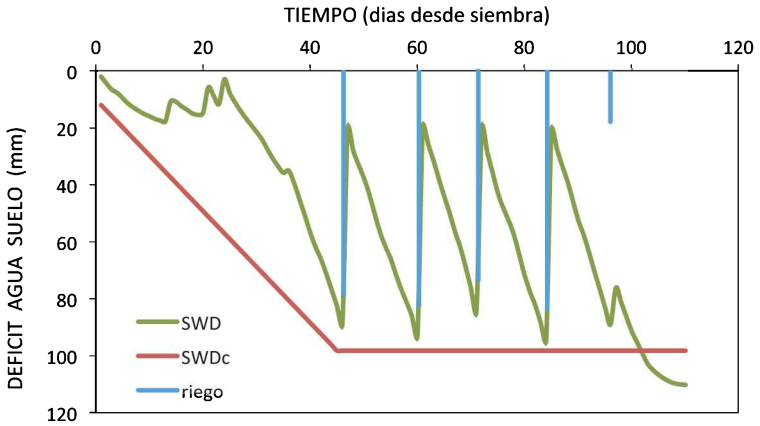


Figura 20.3. Programa de riego de sorgo sembrado el 15 de abril en Hinojosa (España). Se muestran las curvas de déficit de agua del suelo y el déficit crítico. La estrategia seguida es regar cuando SWD es igual a SWD crítico, y aplicar una dosis igual a SWD menos 20 mm.

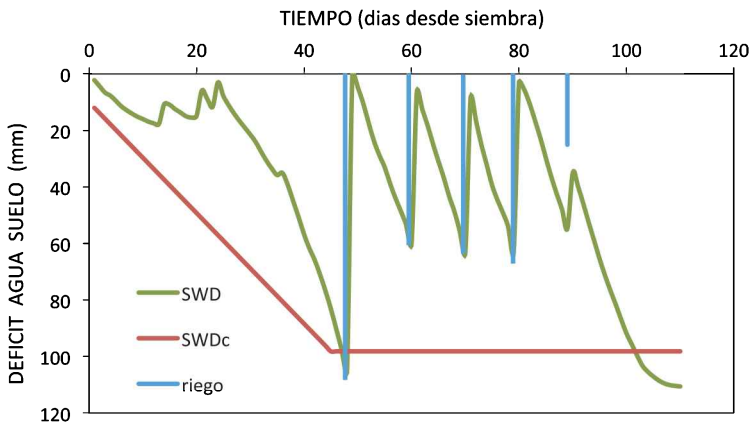


Figura 20.4. Programa de riego de sorgo sembrado el 15 de abril en Hinojosa (España). Se muestran las curvas de déficit de agua del suelo y el déficit crítico. Aquí se supone una rotación fija de forma que el agua está disponible a intervalos de 10 días. La estrategia seguida es regar cuando el SWD esperado 10 días más tarde exceda el SWD crítico, y aplicar una dosis igual a SWD.

de la fecha del último riego hasta la cosecha, lo que permite el cálculo de la profundidad para el último riego como:

$$I = SWD_{t_L} - SWD_{t_H} + \sum_{t_L}^{t_H} ET_i \qquad (20.6)$$

donde t_L y t_H se refieren a las fechas del último riego y de la cosecha, respectivamente.

Ejemplo 20.1.

Estamos regando un cultivo cada vez que el SWD alcanza un valor crítico de 96 mm, que resulta de una profundidad de 1 m de suelo, PAW 160 mm/m y AD=0.6. Tenemos que regar el 1 de septiembre y terminar la campaña el 1 de octubre, después de usar el 90% de la PAW. Por lo tanto el SWD final debería ser 144 mm. La ET media durante Septiembre es de 3 mm/d. Aplicando la ecuación 20.5 calculamos la dosis de riego como:

$$I = SWD_{t_L} - SWD_{t_H} + \sum_{t_L}^{t_H} ET_i = 96 - 144 + 30\ x\ 3 = 42\ mm$$

Observamos que al aplicar la corrección podemos ahorrar 54 mm de agua de riego.

20.6. CALENDARIOS DE RIEGO

Las fechas y las dosis de riego tienen que ser decididas en tiempo real, de acuerdo con las condiciones climáticas de cada año mediante el cálculo diario del SWD en función de la ET del cultivo y de las precipitaciones. En las zonas áridas donde la precipitación es baja, durante la campaña de riego se puede definir a priori un calendario de riego promedio usando los valores medios de ET. Este enfoque fue desarrollado originalmente en California y permite una mejor planificación de la campaña de riego ya que las fechas y las dosis de riego de cada cultivo en la explotación son calculadas al comienzo de la campaña por lo que la asignación de la mano de obra y los equipos de riego pueden ser optimizados.

Cuando los sistemas de riego son permanentes (goteo o aspersión fija), y no hay costes de mano de obra asociados con la aplicación del riego, la determinación de fechas de riego es poco importante y el riego se aplica con la frecuencia que se desee. Por tanto, cuando se utiliza el balance de agua bajo riego de alta frecuencia (p. ej. goteo), se puede ignorar, en principio, el almacenamiento de agua en el suelo, de modo que la estrategia de programación es simplemente reemplazar la ET acumulada desde el último riego. Al igual que se planteó en el Ejemplo 20.4, se puede ahorrar agua de riego al final de la campaña también para riego de alta frecuencia de forma segura mediante el uso de una parte del agua almacenada en el suelo.

Ejemplo 20.1.

Estamos programando el riego de un cultivo de tomate con coeficiente de cultivo 1.2, con un sistema de riego por goteo con goteros de 2 L/h espaciados 1 x 0.75 m. Vamos a calcular el tiempo de operación del sistema en el caso de que la ET_0 de ayer fuera de 7 mm/d.

El día anterior la ET fue:

$$K_c\, ET_0 = 1.2 \text{ x } 7 \text{ mm } d^{-1} = 8.4 \text{ mm } d^{-1}$$

Cada hora de operación del sistema de riego es equivalente a una dosis aplicada:

$$2 \text{ L/h} / (0.75 \text{ m}^2) = 2.67 \text{ mm } h^{-1}$$

Por lo tanto el tiempo de funcionamiento debe ser:

$$8.4 / 2.67 = 3.15 \text{ horas } d^{-1}$$

BIBLIOGRAFÍA

Doorenbos J, Pruitt WO (1977) Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper nº 24. FAO, Rome

Martin D, Stegman E, Fereres E (1991) Irrigation scheduling principles. In: Howell T and Hoffman G (eds) Irrigation Management Monograph. American Society of Agricultural Engineers. Saint Joseph, MI, USA. pp 153-203

Villalobos FJ, Fereres E (1989) A simulation model for irrigation scheduling under variable rainfall. Trans ASAE, 32(1):181-188

Capítulo 21

El riego deficitario

E. FERERES
F.J. VILLALOBOS

RESUMEN:

Cuando el nivel de suministro de riego es menor que la ET del cultivo, se necesitan programas de riego deficitario (RD) para optimizar el uso de los recursos hídricos limitados. En cultivos anuales, en los que el rendimiento y la transpiración son directamente proporcionales, el RD tiene por objeto lograr el máximo beneficio, reduciendo al mínimo las pérdidas de agua asociadas al riego y maximizando el uso del agua almacenada en el suelo. Los cultivos que responden positivamente a los déficit de agua moderados son buenos candidatos para los programas de RD que disminuyen el uso del agua de riego, manteniendo el rendimiento. Los programas de RD para árboles frutales y viñas tienen por objeto concentrar el déficit de agua en los períodos en los que es menos perjudicial para el rendimiento, incluyendo los períodos de alta demanda evaporativa. Conseguir un uso óptimo de una cantidad limitada de agua limitada es un problema de optimización que se resuelve teniendo en cuenta los costes del agua y los precios de los productos agrícolas.

21.1. INTRODUCCIÓN

Durante muchas décadas, el paradigma de desarrollo del riego era suministrar a los cultivos agua suficiente para satisfacer por completo sus necesidades de agua. Este enfoque se adoptó ya que el alto coste de las inversiones asociadas a las redes de riego, desde las presas hasta los equipos de riego en la finca, se justifica mejor si los agricultores consiguen el máximo rendimiento, que normalmente se asocia con la máxima transpiración. Sin embargo, hubo casos de zonas regables en las que, con el fin de llegar a un número máximo de agricultores, el suministro de riego era menor que el necesario para satisfacer por completo la demanda de los cultivos. En otros casos, la capacidad del sistema fue inadvertidamente menor de la necesaria o los escenarios de rotación de cultivos en los que se basó el diseño del sistema habían cambiado con el tiempo y otros cultivos o rotaciones más intensivas fueron introducidos, requiriendo más agua de lo que el sistema original podía suministrar.

Más recientemente, la asignación de agua para el riego ha sido cuestionada por otros sectores de la sociedad con el resultado de que el riego en muchas áreas recibe ahora menos agua que la asignada originalmente. Por otra parte, la escasez de agua debida a las sequías periódicas en muchas áreas está reduciendo el suministro original de riego o haciéndolo menos seguro. Bajo todas estas condiciones, los agricultores no tienen agua de riego suficiente para satisfacer las necesidades de agua del cultivo y la consecuencia es que la transpiración del cultivo se reduce por debajo de su valor máximo. Normalmente, esto se traduce en una reducción en el rendimiento de magnitud variable en función de muchos factores (Capítulo 14). El riego deficitario (RD) se define así como una práctica de manejo del riego que mediante la aplicación insuficiente de agua hace que la transpiración del cultivo sea menor que su valor máximo no estresado. Este capítulo trata sobre cómo gestionar el RD para minimizar las reducciones de rendimiento y maximizar la productividad y los beneficios de los agricultores en situaciones de escasez de agua.

21.2. LA FUNCIÓN DE RESPUESTA DEL RENDIMIENTO AL AGUA

El uso de RD obliga a los agricultores a resolver un problema de optimización: ¿cuál es el nivel óptimo de agua de riego que un agricultor debe utilizar para maximizar sus objetivos? Normalmente, los agricultores tratan de obtener el máximo de ingresos o beneficios netos, que no es necesariamente lo mismo que obtener la producción máxima. La información inicial necesaria para optimizar el uso de un suministro limitado de agua a través de RD es la relación entre el agua aplicada y el rendimiento. Si la relación Y-I es conocida para una situación específica a escala de parcela, el regante puede determinar la cantidad óptima de I para alcanzar el máximo beneficio neto. Este I_{opt} será el nivel de I por encima del cual, el valor del rendimiento adicional producido sería menor que el coste de una unidad adicional de agua. Dada la estrecha relación lineal entre la transpiración y la producción de biomasa discutida en el capítulo 14, y debido a la naturaleza conservadora del índice de cosecha

de muchos cultivos, la relación entre la transpiración y el rendimiento del cultivo es lineal para los principales cultivos en un amplio intervalo de transpiración, comenzando con el rendimiento máximo que se corresponde con la transpiración máxima (ausencia de estrés). Sin embargo, la relación entre el rendimiento y el agua aplicada (Y-I) no es lineal, y se ve afectada por la uniformidad en la distribución del agua de riego sobre el campo.

Para entender mejor las relaciones de Y-I a escala de parcela, la Figura 21.1 muestra la variación de la lámina de riego en diferentes partes del campo, que van desde las áreas que reciben más agua que la lámina requerida a las áreas que reciben menos agua que la requerida. Tales diferencias espaciales son causadas por variaciones dentro del sistema de riego que aplica diferentes cantidades en diferentes partes del campo debido a variaciones de fábrica en los emisores o cambios en la presión, a los efectos del viento y otros factores que causan falta de uniformidad en la distribución de agua. La forma y la pendiente de la línea que describe la distribución real de agua en el campo (Figura 21.1) es indicativa de la uniformidad de distribución. Si la pendiente es suave, la distribución del agua es similar en las diferentes áreas del campo, mientras que si la pendiente es pronunciada, la uniformidad es baja, con algunas zonas que reciben mucha más agua que otras.

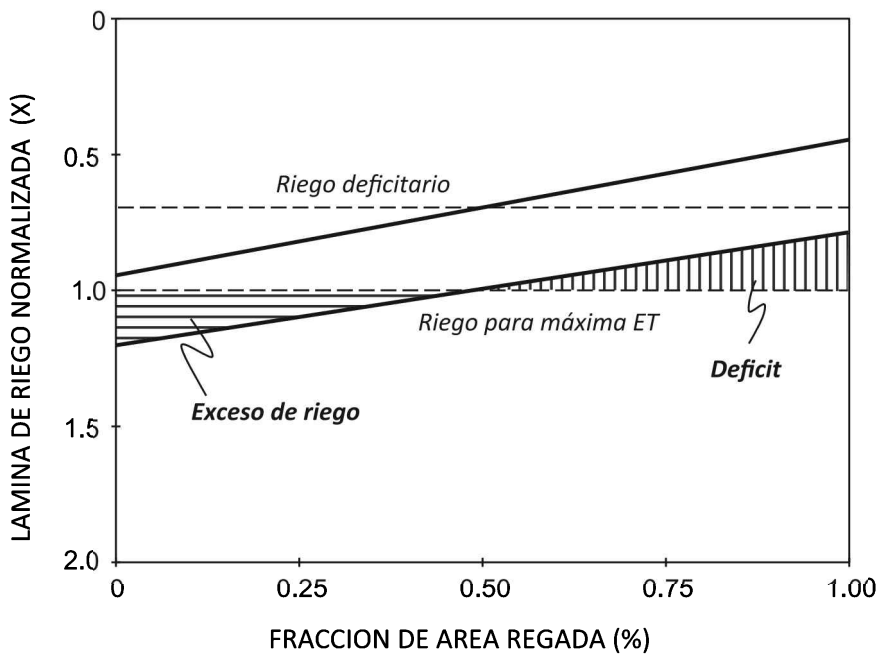


Figura 21.1. Relaciones entre agua de riego aplicada (normalizada) y la fracción de superficie de la parcela que recibe dicha agua. X_R indica la lámina agua requerida, como se muestra por la línea punteada horizontal en 1.0, y otra línea punteada de 0.7 indica un nivel de RD que es un 30% menor que X_R. La distribución real de la lámina aplicada en el campo se muestra por las líneas continuas para riego no deficitario y deficitario, yendo desde las zonas que reciben mayor cantidad de agua a las que reciben menos.

En este caso, se requerirá mayor cantidad agua para aplicar la lámina requerida en las áreas que reciben menos agua. En el caso de RD, donde la cantidad de agua aplicada es menor que lo que se requiere (véase la Figura 21.1), con el mismo nivel de uniformidad habrá áreas dentro del campo que van a recibir mucha menos agua que la requerida y donde los rendimientos podrían verse severamente reducidos por el riego insuficiente.

Como no es físicamente posible lograr una perfecta uniformidad de la aplicación de agua (100%), se debe aplicar agua adicional para llegar a la lámina requerida en las áreas que reciben menos agua. La Figura 21.2 representa una función de respuesta genérica del rendimiento al agua aplicada con dos niveles de uniformidad de riego, alta y baja. También se muestra la relación lineal entre el rendimiento y la ET. A medida que aumenta la cantidad de riego, mayor es la cantidad de esa agua que no se consume como en ET y se pierde por escorrentía o percolación profunda. Si la uniformidad del riego es alta, las pérdidas serán pequeñas y los máximos rendimientos serán alcanzados con poco exceso de agua (Figura 21.2). Sin embargo, si la uniformidad es baja, la aplicación de riego tiene que aumentar para satisfacer las necesidades de las zonas que reciben menos agua mientras que en otras zonas el exceso de agua será considerable. En el caso de la Figura 21.2, para conseguir el máximo rendimiento en condiciones de baja uniformidad del riego la aplicación de agua debe duplicar la lámina necesaria.

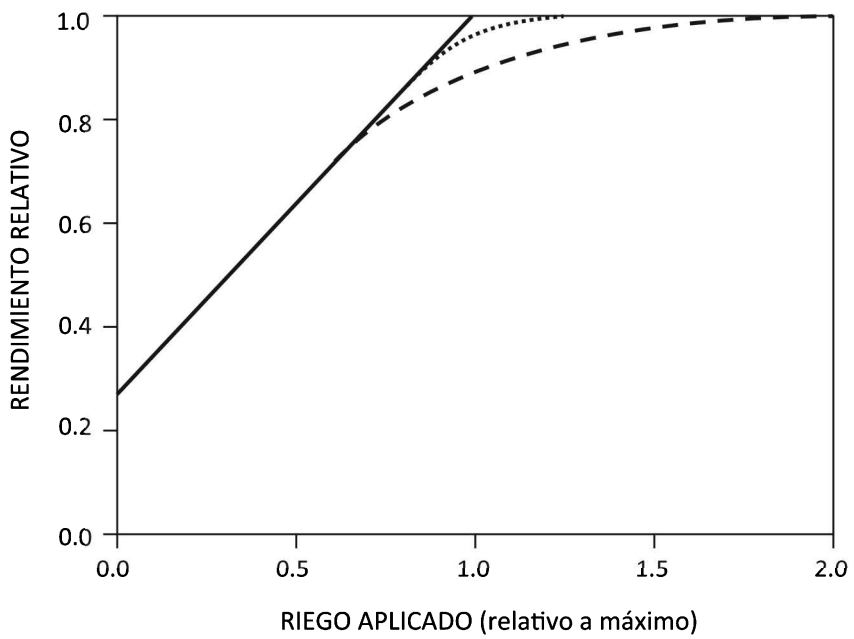


Figura 21.2. Relaciones genéricas entre el rendimiento relativo y el riego relativo bajo dos niveles de uniformidad. También se muestra la relación entre el rendimiento relativo y la ET relativa (línea continua). La alta uniformidad se representa por la línea de puntos y la baja uniformidad por la línea discontinua.

La construcción de la función Y-I para un cultivo en una determinada parcela, necesaria para cuantificar I_{opt} requiere el conocimiento de la relación entre Y y ET y el de la uniformidad de distribución del agua de riego sobre el campo. En la sección 21.6 se presenta un ejemplo avanzado en el que se desarrolla la función de Y-I y se deduce una expresión para I_{opt} sobre la base de algunos supuestos.

21.3. EL RIEGO DEFICITARIO EN CULTIVOS ANUALES

Para definir la función Y-I, se deben conocer las relaciones entre el rendimiento y transpiración. Si bien la relación B-transpiración es única para una especie dada y sólo se ve afectada por el entorno en el que crece, puede variar dependiendo de la duración y la intensidad de los déficits hídricos. Esto se debe a la diferente sensibilidad al estrés hídrico de las diferentes etapas de desarrollo del cultivo. El déficit de agua impuesto en las etapas sensibles afecta mucho más al índice de cosecha (HI) que a la producción de biomasa, mientras que el HI no varía si el déficit hídrico no ocurre o no es severo durante las etapas sensibles. Como regla general, cuando los déficits se imponen progresivamente y son moderados, el HI se mantiene constante y la reducción en Y es proporcional a la reducción en B. La Figura 21.3 muestra las respuestas típicas de Y de un cultivo anual cuando la ET se reduce por déficit hídrico. La línea gruesa representa la respuesta a un déficit de agua uniforme y progresivo, mientras que las dos líneas con mayor pendiente representan las respuestas cuando los déficits de agua son más graves y/o se producen en las etapas más sensibles del ciclo. En la mayoría de los cultivos anuales, las etapas más sensibles son aquellas en las que ocurren los procesos de determinación del rendimiento (floración, cuajado y crecimiento del fruto). Por ejemplo, en el caso de los cereales, la fase reproductiva es más sensible que la fase vegetativa, como veremos a continuación.

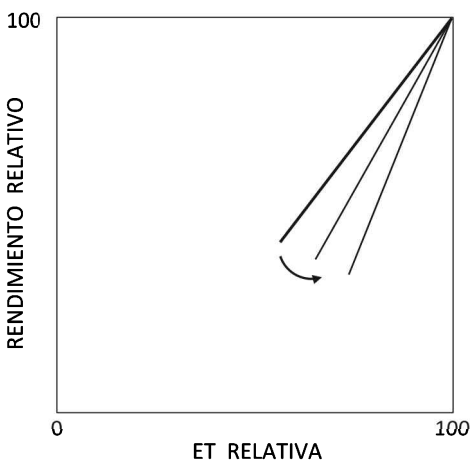


Figura 21.3. Relaciones entre el rendimiento relativo del cultivo y la ET relativa dependiendo de la gravedad del déficit de agua durante las fases sensibles del ciclo. La flecha indica la tendencia de la respuesta al déficit hídrico cuando ocurre en las etapas más sensibles y con mayor severidad.

21.3.1. Maíz

El período más sensible al déficit hídrico es la floración, desde la aparición de las flores masculinas hasta la de las femeninas. De hecho, un déficit de agua severo durante ese período retrasa o impide la aparición de los estigmas, impidiendo la polinización lo que resulta en un número muy bajo de granos. En segundo lugar de sensibilidad se encuentra el comienzo del llenado del grano, durante el que un déficit intenso provoca el aborto de granos. La fase tardía de llenado del grano es menos sensible y menos aún lo es la fase vegetativa, ya que el crecimiento se recupera después de la desaparición de los déficits hídricos. Téngase en cuenta que durante la fase vegetativa, el objetivo es desarrollar un dosel que intercepte el máximo de radiación, por lo que una reducción importante (e irreversible) en la expansión del dosel también limita sustancialmente el rendimiento. En general, el maíz no es un cultivo propicio para el RD, ya que cualquier reducción medible en transpiración tiene un impacto negativo en Y. El déficit de transpiración leve, alrededor del 10% o menos, durante la segunda mitad de la fase vegetativa, es el que provoca el menor impacto en la producción y podría ser una estrategia viable de RD en caso de escasez de agua.

21.3.2. Trigo

Al igual que en otros cereales de invierno, la floración es el período más sensible, en particular, desde la polinización hasta el cuajado. Sin embargo, las etapas de desarrollo que tienen lugar antes y después de la polinización son también muy sensibles. En la fase previa a la floración, cuando se está determinando el número de flores en las espigas, los déficits de agua pueden causar una reducción en el número de granos. Después de la polinización, el aborto de granos también reduce el número de granos bajo estrés hídrico. El llenado del grano en sus primeras etapas es también muy sensible a la falta de agua al afectar negativamente el peso del grano. Durante la fase vegetativa temprana, el trigo es bastante tolerante al déficit hídrico, pero en la etapa de ahijamiento, el déficit puede reducir el número de hijos. Los cereales de invierno tienen mecanismos compensatorios, y una reducción en el número de granos puede ser compensada parcialmente por el aumento de peso del grano, si las condiciones durante el llenado del grano son favorables. Por lo tanto, el riego deficitario de trigo es una estrategia viable si los déficits son ligeros y se limitan a la las fases vegetativa temprana y reproductiva tardía. Hay situaciones, sin embargo, en que los agricultores tienen acceso a una cantidad limitada de agua para riego, suficiente para aplicar un solo riego. En ese caso, en función de la probabilidad de lluvia y la capacidad de almacenamiento de agua del suelo, el momento más provechoso para complementar la precipitación estaría alrededor de floración. En suelos poco profundos y con baja probabilidad de lluvia en post-floración, habría que demorar el riego todo lo posible para evitar el estrés grave durante el llenado del grano, mientras que en el caso contrario (suelo profundo y/o precipitación después de floración), el único riego sería más beneficioso en la etapa de prefloración para maximizar la número de granos que luego podrían ser llenados gracias al agua almacenada en el suelo.

21.3.3. Arroz

Este cultivo generalmente se cultiva bajo condiciones de inundación por lo que no se somete a déficits hídricos. Sin embargo, hay nuevos métodos de cultivo de arroz que se basan en el humedecimiento y secado del suelo. El arroz es una planta extremadamente sensible al déficit hídrico y tiene un sistema radical pequeño y somero. Diversos trabajos de investigación ha demostrado que los pocos días (2-3) en torno a polinización son los más sensibles al déficit, que puede causar pérdida de cosecha casi completa. No es un cultivo que pueda ser sometido a riego deficitario y el agua disponible debe ser concentrada en un área tal que permita el riego para satisfacer por completo sus necesidades hídricas.

21.3.4. Soja

Aunque se trata de una planta de tipo indeterminado, la floración de la mayoría de las variedades modernas es determinada, y se produce normalmente durante un corto periodo de 2-3 semanas. El déficit de agua durante la floración y el cuajado de los frutos es el más perjudicial para el rendimiento. El segundo período más sensible es el llenado del grano, en el que la escasez de agua causa la senescencia prematura de las hojas y reduce la capacidad de la planta para llenar las semillas. El estrés hídrico durante el período vegetativo afecta a la cobertura del dosel y por lo tanto a la radiación interceptada, mientras que si se produce durante la última parte de dicho período, es menos perjudicial, siempre y cuando no se llegue al punto de acelerar la senescencia de las hojas. La soja se cultiva sobre todo en secano, por lo que la probabilidad de emplear riego deficitario es pequeña; sin embargo, en términos de sensibilidad relativa, la soja es bastante sensible a los déficits de agua, aproximadamente tan sensible como el maíz, por lo que la estrategia de RD debe ser bastante conservadora, con el objetivo de producir al menos 80-90% de los rendimientos máximos.

21.3.5. Patata

Es muy sensible a los déficit de agua y por lo tanto un candidato para estrategias de RD que se limiten a un estrés leve. La etapa más sensible es la de la formación de estolones y la iniciación de los tubérculos, pudiendo tener un gran impacto sobre el rendimiento. La fase inicial de crecimiento del dosel también es muy sensible por el efecto del déficit sobre la expansión. El período de crecimiento del tubérculo es menos sensible pero los rendimientos también se ven afectados, en particular, si la senescencia foliar se acelera por la falta de agua. La sensibilidad relativa al estrés hídrico varía un poco entre la amplia gama de variedades que existen.

21.3.6. Sorgo

Es tolerante al déficit hídrico y es un buen sustituto para el maíz cuando la escasez de agua obliga al uso de RD. Los déficits entre ligeros y moderados tienen poco

impacto en los rendimientos debido a un aumento en el índice de cosecha. La estrategia de RD más favorable es mantener el nivel de déficit de agua durante toda la campaña, por ejemplo aplicando el 75% del total de las necesidades de ET, con el objetivo de llegar a cosecha con el suelo agotado en la profundidad radical. Se ha demostrado que el estrés intenso que reduzca la ET por debajo de 50-60% del máximo provoca una disminución del HI de este cultivo y es perjudicial para el rendimiento. Por lo tanto la estrategia de RD para el sorgo debería tener por objeto la reducción de la ET no más del 60% del máximo, y el nivel económico óptimo estaría en el 70-80% del máximo dependiendo de los costes y de la disponibilidad de agua de riego.

21.3.7. Tomate

Como muchos otros cultivos hortícolas el tomate no es susceptible de riego deficitario ya que los rendimientos se reducen con la reducción de ET. Sin embargo, diversos trabajos realizados con tomate para industria han demostrado que los déficits leves durante la maduración reducen ligeramente la ET (alrededor de un 10% o menos) sin afectar al rendimiento. Por lo tanto, la etapa de menor sensibilidad para la imposición de déficit de agua es la fase de maduración tardía. El estrés impuesto durante otras etapas del ciclo reducen el crecimiento, la fructificación y el rendimiento.

21.3.8. Caña de azúcar

Es muy sensible al déficit de agua durante el período de crecimiento del tallo en la fase temprana del ciclo. El periodo de maduración es el menos sensible de forma que el déficit de leve a moderado favorece la acumulación de sacarosa en el tallo y reduce el peso fresco recolectado (y el coste). Por lo tanto, el RD debería imponer el déficit durante el período de maduración con reducciones de ET de no más del 10-15% del valor estacional. Por otro lado, el suministro de agua no debería limitar el crecimiento del dosel hasta que se alcance el máximo de cobertura.

21.3.9. Algodón

Es un buen candidato para el RD en zonas en las que la duración del ciclo está limitada por las bajas temperaturas al principio y al final de la temporada. El déficit de agua se puede utilizar para ajustar el cultivo a esos ambientes mediante la imposición de déficit durante el período de crecimiento vegetativo tardío para acelerar la floración y la formación de las cápsulas, y durante la fase de maduración para mejorar la apertura de las cápsulas y la sincronía para una recolección mecánica eficaz. Los déficits de agua moderados aplicados durante esas dos fases dan como resultado un aumento de HI en comparación con el de cultivos sin estrés y un acortamiento del ciclo que se ajusta así mejor a las condiciones ambientales. En este cultivo, al igual que para el sorgo, la escasez extrema de agua es perjudicial y tiene un efecto

negativo sobre el HI, por lo que el RD debe garantizar una ET estacional superior al 60-70% de la máxima. El período más sensible, en el que se deben evitar los déficits de agua es el de cuajado para prevenir el aborto de frutos.

21.3.10. Girasol

Es una especie que sigue la estrategia de evitación de la sequía. Muestra muy altas tasas de crecimiento durante la fase vegetativa, pero durante el desarrollo reproductivo acumula materia seca mucho más lentamente a medida que concentra en las semillas y proteínas con alto contenido energético. El período que va desde el final de la floración hasta comienzo de cuajado es el más sensible al déficit hídrico, seguido por la fase inicial de llenado de las semillas, y por la fase tardía de llenado y la de crecimiento vegetativo temprano, mientras que la fase vegetativa tardía es la menos sensible. Esto se debe a que el girasol tiene una fuerte capacidad de crecimiento compensatorio después de sufrir déficit hídrico durante la fase vegetativa. Las estrategias de RD deberían tener como objetivo la imposición de déficits moderados durante la fase vegetativa, mucho después del establecimiento del cultivo, y aliviando el déficit antes de que se complete el crecimiento foliar. Tal plazo no es muy largo en relación con el ciclo del cultivo. Por lo tanto, para lograr el óptimo, las reducciones de ET no deben exceder de 10-15% de ET estacional.

21.4. EL RIEGO DEFICITARIO DE ÁRBOLES FRUTALES Y VIDES

La medida más eficaz para responder a la escasez de agua en los cultivos anuales es ajustar la superficie sembrada a la cantidad de agua disponible. Esto no es posible en cultivos permanentes, en los que los costes de inversión son sustanciales y el mantenimiento de las plantaciones es el objetivo principal. Ocasionalmente los agricultores aprovechan los periodos de sequía para plantaciones viejas por otras nuevas de diferentes especies o variedades. Con esa excepción, será necesario utilizar algún tipo de RD para hacer frente a los suministros limitados y para minimizar el impacto de los déficit de agua. Esto es particularmente importante debido al impacto de los déficits hídricos en el rendimiento del año siguiente en cultivos permanentes, y además para evitar la muerte del árbol con las graves consecuencias económicas por las pérdidas de inversión plurianuales si se pierde la plantación.

Las respuestas de los árboles frutales y vides a los déficits de agua son mucho más complejas que las de los cultivos anuales. Los procesos de determinación del rendimiento son menos conocidos que los de cultivos anuales, y por lo general, los rendimientos oscilan con el tiempo, incluso en condiciones óptimas de crecimiento, una característica conocida como vecería que varía en importancia entre las diferentes especies y variedades de árboles frutales. El déficit de agua en la campaña actual afecta a los rendimientos de las campañas posteriores, dependiendo del momento de ocurrencia y de su gravedad. El conocimiento de la sensibilidad diferencial de los diferentes procesos a los déficits de agua se convierte así en muy importante para

distribuir la aplicación de agua de manera que se evite un impacto negativo en el rendimiento del año actual y/o el año siguiente.

Los experimentos con melocotonero y peral han demostrado que el riego puede ser restringido en los períodos en que los rendimientos no son sensibles al estrés hídrico y que se puede ahorrar agua reduciendo poco o nada el rendimiento, y en algunos casos aumentando el beneficio en comparación con regar para máximas necesidades. Este enfoque de imponer el déficit hídrico en árboles y vides en ciertas etapas del desarrollo consideradas insensibles se ha denominado riego deficitario controlado (RDC), un término que se utiliza ahora para cualquier enfoque de RD empleado en árboles. Sin embargo, hay otro enfoque de RD que consiste en aplicar una fracción de la ET a lo largo de la campaña de riego. Esta estrategia de RD sostenido o continuo (RDS), genera un patrón de estrés que es diferente del obtenido con RDC, al menos en ambientes templados, en los que la ET_0 varía ampliamente durante la estación de crecimiento. El patrón de déficit habitual en RDS comienza temprano en la campaña, cuando se aplica una fracción de la ET, pero los árboles extraen más agua del suelo con la consecuencia de que el déficit de agua rara vez se desarrolla pronto. Dependiendo de la magnitud del déficit y de la capacidad de almacenamiento de agua de la zona radical, el déficit de agua se incrementará en severidad en RDS a medida que avanza la temporada, alcanzando el nivel más alto cuando la ET_0 es más alta cerca del final de la temporada, en ausencia de precipitaciones.

21.4.1. Riego deficitario controlado

En RDC, la base fisiológica para la imposición de estrés hídrico en etapas específicas de desarrollo reside en la sensibilidad diferencial del crecimiento vegetativo y de la fotosíntesis al estrés hídrico (Capítulo 14). El crecimiento expansivo es más sensible al déficit que la asimilación de carbono, y por tanto, el déficit de leve a moderado ralentiza o detiene el crecimiento de hojas y tallos antes de que impacte a la fotosíntesis. Durante el crecimiento del fruto de algunas especies de árboles, hay períodos en los tiene lugar el crecimiento vegetativo mientras que el crecimiento del fruto se ralentiza hasta casi detenerse. En esos períodos, el déficit de agua reduce el crecimiento en general, pero el fruto puede recuperarse por completo después de la liberación del estrés, mientras que el crecimiento vegetativo se ha reducido de forma irreversible. El resultado es un menor crecimiento vegetativo (y menor coste de poda), mientras que el tamaño del fruto no se ve afectado. Hay algunas especies en las que el déficit moderado provoca un cambio en la partición de asimilados a favor de los frutos y esto también se traduce en efectos beneficiosos sobre el rendimiento y la calidad de la fruta. En árboles de hoja caduca, el período después de la recolección es otro periodo insensible, y se puede aplicar déficit sin afectar al rendimiento, siempre que los procesos de desarrollo de la yema del próximo año se hayan completado.

Una ventaja importante del RD en árboles frutales y vides está relacionada con la mejora de las características de calidad de la fruta causadas por el déficit de agua moderado. El caso más importante es el de las uvas para vino. Las plantas que cre-

cen bajo déficit hídrico moderado aplicado tanto en la fase inicial de crecimiento del fruto como en la fase tardía, después de enverado (cambio de color de las bayas), muestran una mayor síntesis de compuestos bioquímicos que son componentes esenciales de calidad del vino. De hecho, los vinos de alta calidad se producen sobre todo en ambientes con precipitación baja o riego muy deficitario, mientras que los vinos producidos a partir de uvas cultivadas bajo suministro ilimitado rara vez son de buena calidad. Otras frutas se benefician por un aumento en el contenido de azúcares u otros cambios positivos en la composición inducidos por el RD, aunque, a diferencia de la producción de vino, las características cualitativas de la mayoría de las frutas no son determinantes del precio que los agricultores reciben por sus productos. De hecho, el tamaño del fruto es un factor que se aprecia en muchos mercados y el RD tiende a reducirlo en comparación con riego no deficitario. En ese caso, la pérdida económica debida a RD lo hace inviable, como en el caso de la manzana.

La respuesta del rendimiento a los déficits de ET generados por estrategias de RDC se puede generalizar en la Figura 21.4. Se pueden delimitar tres regiones diferentes de respuesta; la Región A, en la que las pequeñas reducciones de ET obtenidas con RDC durante los períodos insensibles no afectan a los rendimientos. Conforme aumenta el déficit de ET, también lo hace la reducción del rendimiento (Región B) aunque a una velocidad baja. Si la escasez de agua se vuelve más grave, la disminución del rendimiento se dispara (Región C) y los déficits de agua de esa magnitud pueden afectar los rendimientos severamente si se producen parcialmente en los períodos más sensibles (línea de puntos en la Figura 21.4).

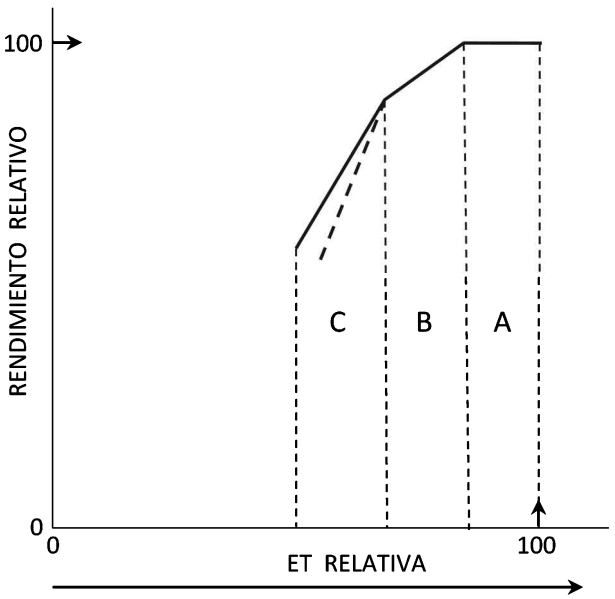


Figura 21.4. Respuesta general del rendimiento a los déficits de ET inducidos por estrategias de RDC en frutales expresada en términos relativos.

La magnitud de la respuesta en la región A varía en función de la especie; desde las muy sensibles como el aguacate, el nogal y el manzano en las que no se ha encontrado, hasta una reducción de aproximadamente 5-15% de ET para cítricos (dependiendo de las especies y variedades), perales, y almendros, entre otros, 10-20% para melocotón, ciruelo, albaricoque y pistacho, hasta un 20-30% de reducción de la T sin afectar a los rendimientos como en el caso del olivo.

La región B también varía en magnitud con las especies y cultivares, pero sigue las sensibilidades diferenciales indicadas para las distintas especies en la región A. La pendiente suave indica que el ahorro de agua debe ser comparado con las pérdidas de rendimiento para lograr el beneficio óptimo con RD. Por el contrario, las fuertes pendientes de la Región C sugieren que los déficits de ET de tal magnitud tendrán efectos perjudiciales sobre los beneficios por lo que debe ser evitada a toda costa.

21.5. EL RIEGO DEFICITARIO EN LAS EXPLOTACIONES

Las restricciones de agua que se producen en la finca obligan a los agricultores a tomar decisiones estratégicas antes de la siembra. Deben decidir qué cultivar, y cómo asignar diferentes cantidades de agua a cada uno de los cultivos para hacer el mejor uso de la oferta disponible. Los diferentes cultivos necesitan diferentes cantidades de riego y su calendario de riego es también diferente. Las cuestiones económicas (mercados y subsidios) son críticos en la determinación de los beneficios de la finca una vez que se conoce el agua disponible. El objetivo sería optimizar el uso de la tierra y del agua de riego teniendo en cuenta las restricciones de suministro, y esto se logra mediante el uso de modelos de optimización económica. Estos modelos proporcionan distribuciones óptimas de cultivos y las cantidades óptimas de riego para cada uno de ellos que maximizan la función objetivo, que normalmente es el total de ingresos de la explotación. Una vez que el modelo se construye, puede ser utilizado para explorar diferentes escenarios de precios de productos y precios del agua y para analizar otros factores, tales como el impacto de cambios en los subsidios en las decisiones estratégicas por parte de los agricultores. Un factor que complica las decisiones a nivel de finca es la incertidumbre acerca del nivel de restricciones de agua. Con demasiada frecuencia, las autoridades responsables de la gestión de las aguas retrasan demasiado la comunicación de la restricción a los agricultores, por lo que algunas de las mejores opciones para el uso de recursos hídricos limitados (por ejemplo, la siembra temprana) ya no son factibles. En el caso de una sequía, los agricultores deben ser proactivos para asegurar sus suministros de agua y deben mantener una comunicación abierta con la autoridad gestora del agua para poder tomar las mejores decisiones en condiciones de incertidumbre.

21.6. OPTIMIZACIÓN CUANTITATIVA DEL RIEGO DEFICITARIO

Partimos de la hipótesis de que la producción de biomasa es proporcional a la transpiración y que el índice de cosecha no varía con el nivel de estrés hídrico. Esto es

válido para los casos de déficit de leve a moderado. Por lo tanto, el rendimiento será proporcional a la transpiración en cualquier lugar del campo regado. También suponemos que la evaporación desde la superficie del suelo (E_s) es igual en todos los puntos del campo y que el exceso de riego no causa ninguna penalización en el rendimiento.

Seguidamente tenemos que tener en cuenta la variación de la lámina de riego aplicada. Suponemos que el riego aplicado sigue una distribución estadística uniforme (es decir, rectangular). Por lo tanto el riego (I) aplicado varía entre un mínimo I_{min}= I_{mean} (2 U_{cc}-1) y un máximo I_{max}= I_{mean} (3-2 U_{cc}) donde I_{mean} es la media del riego aplicado y Ucc es el coeficiente de uniformidad (Capítulo 19). La necesidad de agua de riego de un cultivo se definió en el capítulo 10 como:

$$IWR_n = ET - P_e - SWE \quad (21.1)$$

donde ET es la ET estacional máxima (en ausencia de déficit), P_e es la precipitación efectiva y SWE es la extracción de agua del suelo entre la siembra y la cosecha.

Tenemos tres situaciones posibles:

a) I_{max}<IWR_n: Todo el campo es regado deficitariamente, ya que incluso en el punto de máxima lámina no se satisface la necesidad neta de agua del cultivo. En este caso el rendimiento será proporcional a la transpiración, y por lo tanto a la lámina de riego aplicada en cada punto del campo.

b) I_{min}>IWR_n: Todo el campo recibe riego en exceso, ya que incluso en el punto donde la lámina es mínima se excede la necesidad neta de agua del cultivo. En este caso el rendimiento será el mismo en todo el campo e igual a Yx (rendimiento máximo).

c) I_{min}<IWR_n<I_{max}: Partes del campo reciben riego en exceso y otras lo reciben deficitariamente. Por lo tanto hay zonas que alcanzarán Yx mientras que en otras el rendimiento será proporcional a la lámina aplicada en esa zona.

Para calcular el rendimiento medio en todo el campo se calcula la integral de rendimiento utilizando el riego aplicada (I) como variable de integración. Por ejemplo, para el caso c calculamos:

$$\bar{Y} = \frac{1}{I_{max} - I_{min}} \left[\int_{I_{min}}^{IWR_n} Y_x \frac{ET - E_s - IWR_n + I}{ET - E_s} \, dI + \int_{IWR_n}^{I_{max}} Y_x dI \right] \quad (21.2)$$

Y después de la integración obtenemos la relación entre el rendimiento real (kg/ha) y el riego medio aplicado (I_{mean}, mm):

$$\bar{Y} = Y_x \left(A - \frac{B}{I_{mean}} - C I_{mean} \right) \quad (21.3)$$

donde

$$A = \frac{3 - 2\,U_{cc}}{4\,(1 - U_{cc})} - \frac{(2\,U_{cc} - 1)(SWE + P_e - E_s)}{4\,(1 - U_{cc})(ET - E_s)} \tag{21.4}$$

$$B = \frac{IWR_n{}^2}{8\,(1 - U_{cc})(ET - E_s)} \tag{21.5}$$

$$C = \frac{(2\,U_{cc} - 1)^2}{8\,(1 - U_{cc})(ET - E_s)} \tag{21.6}$$

Para el caso a (I_{max}<IWR_n):

$$\bar{Y} = \frac{Y_x}{ET - E_s}(SWE + P_e - E_s + I_{mean}) \tag{21.7}$$

Y para el caso b (I_{min}>IWR_n): $\bar{Y} = Y_x$

Este modelo permite ilustrar varios aspectos interesantes:

a) Para lograr el rendimiento máximo es necesario aplicar IWR_n/ (2 U_{cc}-1). Por ejemplo, con U_{cc} = 0.75 la cantidad media de riego aplicado debe doblar la necesidad de riego.

b) Es evidente que la mejor estrategia para lograr el máximo beneficio será probablemente aplicar menos agua que la necesaria para el rendimiento máximo. El valor óptimo dependerá del precio del producto cosechado ($P_{H,,}$ €/kg) y el coste del agua de riego (Q_I, €/m³):

$$I_{opt} = \sqrt{\frac{B}{\frac{10\,Q_I}{P_H Y_x} + C}} \tag{21.8}$$

De la que podemos deducir una eficiencia aparente óptima (AOE) de riego:

$$\frac{IWR_n}{I_{opt}} = \sqrt{\frac{10\,Q_I(ET - E_s)\,8\,(1 - U_{cc})}{P_H Y_x} + (2\,U_{cc} - 1)^2} \tag{21.9}$$

Esta ecuación indica que la AOE está relacionada con el sistema de riego (U_{cc}), con la especie de cultivo y la localidad (cociente (ET-E_s)/Y_x) y con factores económicos externos (cociente Q_I/P_H). Como la diferencia es ET-Es es igual a la transpiración es-

tacional, la relación $(ET\text{-}E_s)/Y_x$ es proporcional a la inversa de la eficiencia en el uso del agua (Capítulo 14) por lo que debe ser proporcional a VPD y difiere entre entre especies C3 y C4.

Ejemplo 21.1.

Cultivamos maíz con un rendimiento máximo de 12000 kg/ha y ET estacional de 750 mm con E_s = 150 mm. Los valores de P_e y SWE son 150 y 100 mm, respectivamente. El sistema de riego es por aspersión con Ucc = 0.75. El precio del maíz es de 0.3 €/kg. Si el precio del agua es de 0.05 €/m^3, la eficiencia aparente óptima será 0.645 por lo que debería aplicarse IWR_n/AOE = 500/0.645 = 775 mm. En este caso, el rendimiento sería 11836 kg/ha (de la ec. 21.3). Con un precio del agua de 0.15 €/m^3, deberíamos aplicar 577 mm (AOE = 0.866) para obtener un rendimiento de 11226 kg/ha.

BIBLIOGRAFÍA

Fereres E, Soriano MA (2007) Deficit irrigation for reducing agricultural water use. J Exp Bot 58:147-159

Steduto P, Hsiao TC, Raes D, Fereres E (2012) Crop Yield Response to Water. Irrigation and Drainage paper 66, FAO, Rome, Italy

Capítulo 22

El control de la salinidad

F.J. VILLALOBOS
L. MATEOS
M. QUEMADA
A. DELGADO
E. FERERES

RESUMEN:

La salinidad es una amenaza para la sostenibilidad de muchos sistemas agrícolas y especialmente para las zonas de riego en zonas áridas y semiáridas. Además de la posible toxicidad específica, el efecto principal de las sales es la reducción del potencial osmótico en el suelo que causa un efecto similar al del déficit de agua. El rendimiento esperado en condiciones de salinidad puede ser calculado con un modelo simple cuyos parámetros son la EC_e umbral y la pérdida de rendimiento por unidad de aumento en la EC_e. La ecuación del balance de sales nos permite deducir la salinidad del suelo en base a la EC del agua de riego y a la fracción de lavado. Las necesidades de lavado se calculan teniendo en cuenta la frecuencia de riego, la EC del agua de riego y la EC_e deseada. La presencia de sodio deteriora la estructura del suelo, pero el efecto depende de otros factores, en particular, de la salinidad del agua de riego. La recuperación de suelos salinos se realiza mediante el lavado de sales, mientras que los suelos sódicos habitualmente se regeneran añadiendo yeso y lavando el Na.

22.1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la FAO en torno al 20% de las tierras de regadío ocupa suelos afectados por salinidad mientras que las sales afectan a menos del 3% de la superficie agrícola de las tierras cultivadas en secano. Los suelos afectados por sales se encuentran principalmente en las zonas áridas y semiáridas de regadío. La prevención de la acumulación de sales en los suelos y aguas con una gestión adecuada es crucial para evitar la degradación del suelo y por lo tanto para asegurar la sostenibilidad de la agricultura. En el caso de zonas de regadío, la sostenibilidad se basa en el mantenimiento de un equilibrio de la salinidad del suelo, que depende de la concentración de sales del agua de riego y del balance de agua del suelo.

La fuente primaria de sales es la meteorización de los minerales, pero esta fuente apenas provoca la salinización en los suelos agrícolas. La salinización del suelo es la consecuencia de un suministro externo de sales que en la agricultura de regadío está asociada con la aplicación de aguas que contienen sales, mientras que en la agricultura de secano se relaciona con fenómenos de salinización secundaria, por lo general causada por el movimiento ascendente de agua y sales del subsuelo provocado por cambios en la hidrología. Por lo tanto, los balances de agua y sales están estrechamente unidos. La concentración de sal en la solución del suelo es mayor que la del agua que se infiltra en el mismo. Esta diferencia es el resultado de que la evaporación desde el suelo no transporta sales, mientras que la absorción de agua por la raíz sólo lo hace de forma muy selectiva. Por lo tanto, la salinidad es una amenaza real en las zonas agrícolas de las regiones áridas o semiáridas debido a las altas tasas de ET y por la escasez de agua para lixiviar las sales fuera de la zona radical.

La contribución de las sales del agua de lluvia es insignificante, pero puede ser importante en las zonas costeras cuando los vientos del mar transportan sales en los aerosoles. El agua de riego en sí es a menudo la causa de la salinización, ya que todas las aguas de riego contienen sales en concentraciones variables. Por otro lado, el exceso de riego provoca percolación que se lleva sales que eventualmente pueden llegar al mar. El mar también puede ser la fuente directa de la salinización en algunos casos: los suelos originados a partir de sedimentos marinos puede ser salinos o las intrusiones marinas pueden causar salinización de origen subterráneo, es decir, por el movimiento ascendente de agua a partir de una capa freática salina. Además de las fuentes naturales de sal, la aplicación excesiva de fertilizantes también puede contribuir a la salinización.

22.2. EFECTOS DE LA SALINIDAD EN LOS CULTIVOS

La salinidad se cuantifica como la conductividad eléctrica de la solución del suelo (EC, dS/m) o por la concentración de sal (C_S, g/L) que se relacionan aproximadamente por EC = 0.64 C_S. La concentración de cationes (o aniones) (CC, meq/L) también está relacionada con la EC, por CC = 10 EC. El potencial osmótico (Ψ_o, kPa) puede estimarse a partir de la concentración de sal como Ψ_o = 56.25 C_S. La conductividad eléctrica se mide normalmente en un extracto de suelo saturado (EC_e) que

es aproximadamente la mitad del valor de la EC de la solución del suelo a capacidad de campo (EC_{FC}).

Los efectos de una alta concentración de sal en el suelo sobre el rendimiento de los cultivos se deben a: (i) la reducción del potencial osmótico en la solución del suelo, que en muchos aspectos se asemeja al déficit hídrico, y (ii) la toxicidad y trastornos de la nutrición (efectos antagónicos) causados por los principales iones presentes en las sales (Cl, Na, B). Los efectos negativos de la salinidad en los cultivos dependen de la especie y de la etapa de desarrollo. Un problema adicional se produce con la acumulación de sodio en el suelo, conocido como sodicidad del suelo, que causa la degradación de la estructura del suelo.

La principal diferencia entre el déficit hídrico del suelo y los efectos osmóticos debidos a las sales es que un bajo contenido de agua del suelo tiene dos efectos. El primero es el bajo potencial hídrico del suelo, por lo que las raíces, necesitan mantener un potencial de agua inferior para que se produzca absorción de agua. El segundo es la disminución de la conductividad hidráulica del suelo, cuando está seco, por lo que incluso con un potencial muy bajo en las raíces, el movimiento del agua desde el suelo a la superficie de las raíces está limitado por la baja conductividad hidráulica. El efecto de la salinidad es similar al primer efecto del bajo contenido de agua en el suelo, pero la conductividad hidráulica no se ve afectada en el caso de la salinidad.

Ejemplo 22.1.

Un suelo no salino (llamado A) en punto de marchitez tiene un potencial matricial de -1500 kPa y un potencial hídrico de -1500 kPa. Tenemos otro suelo (llamado B), con la misma textura, pero salino. El suelo B se encuentra en capacidad de campo (potencial matricial de -20 kPa) y tiene EC_e = 8.4 dS/m (por lo que EC_{FC} = 16.8 dS/m). Por lo tanto el suelo B tiene potencial osmótico -1480 kPa y su potencial hídrico será -1500 kPa. A pesar de tener el mismo potencial de agua en el suelo la transpiración es cero para el suelo A, mientras que en el caso del suelo B la transpiración puede ser importante para varias especies cultivadas (p.ej., centeno).

22.2.1. Impactos de la salinidad sobre la productividad del cultivo

Un suelo se clasifica salino cuando la conductividad eléctrica del extracto de saturación es mayor de 4 dS/m. Este nivel representa menos del 10% de la salinidad del agua de mar (50-60 dS/m), pero es suficiente para afectar negativamente al crecimiento de muchas especies cultivadas. El aumento de la concentración de sales en el suelo implica una disminución del potencial osmótico, y por lo tanto una disminución en el potencial de agua en el suelo que se traduce en menor potencial de la parte aérea, que en último término conduce a un menor crecimiento expansivo.

Hay una amplia variabilidad en la sensibilidad de las especies cultivadas a la salinidad, y también entre los cultivares dentro de una especie. Un modelo simple de respuesta de los cultivos a la salinidad cuantifica la sensibilidad o tolerancia mediante

dos parámetros. El primero es un valor de salinidad umbral, EC_{eu} (medida como EC del extracto de saturación del suelo) por encima de la cual el rendimiento disminuye. El segundo parámetro (B_s) es el porcentaje de pérdida de rendimiento por unidad de incremento en la EC_e. El rendimiento relativo (Y/Y_x) expresado como una fracción del rendimiento máximo se puede calcular entonces como:

$$\frac{Y}{Y_x} = 1 - \frac{B_s}{100}(EC_e - EC_{eu}) \tag{22.1}$$

Maas y Hoffman publicaron en 1977 una revisión sobre la tolerancia de los cultivos a la salinidad, cuyos resultados se resumen en la Tabla 22.1. Los cultivos se clasifican como sensibles, moderadamente sensibles, moderadamente tolerantes y tolerantes de acuerdo con los valores de los parámetros de EC_{eu} y B_s (Tabla 22.2). La mayoría de los árboles frutales son sensibles, la mayoría de los cultivos hortícolas son moderadamente sensibles y la mayoría de los cultivos anuales extensivos se encuentran entre moderadamente sensibles y moderadamente tolerantes.

Tabla 22.1. Sensibilidad de diferentes especies cultivadas a la salinidad. Para la respuesta a la salinidad se muestran dos parámetros: EC_{eu} (dS/m) es el valor de EC_e por debajo del cual el rendimiento no se ve afectado. B_s (%/ (dS/m)) es la pendiente de la relación lineal entre el rendimiento (% del máximo) y EC_e. Los cultivos se clasifican como sensibles (S), moderadamente sensibles (MS), moderadamente tolerantes (MT) y tolerantes (T). En relación con el daño foliar por riego por aspersión, se muestra la concentración umbral de Na o Cl (meq/L). La concentración máxima de B (mg/L en el extracto saturado del suelo) y Na (ESP,%) en el suelo por encima del cual se puede producir toxicidad también se muestran. Adaptado de Ayers y Wescott (1989)

Nombre común	EC_{eu}	B_s	Tipo	Na o Cl en agua	B en el suelo	Na en el suelo (ESP)
	dS/m	dS/m/%		meq/L de Na o Cl	mg/L en extracto saturado	%
Alfalfa (heno)	2	7.3	MS	10.0-20	4.0-6.0	>40
Manzano	1	18	S			<15
Cebada	6	7.1	T	10.0-20		
Judía (Phaseolus) (seca)	1	18.9	S			<15
Algodón	7.7	5.2	T	>20	6.0-15.0	>40
Vid (vino)	1.5	9.5	MS	5-10.0	0.5-0.75	
Lechuga	1.3	13	MS	-	2.0-4.0	15-40
Maíz (grano)	1.7	12	MS	10.0-20	2.0-4.0	<15
Mijo			MS			
Olivo	5.00	7	MT			

Naranjo	1.3	16	S	<5	0.5-0.75	<15
Palmera	4	3.6	T			
Melocotón	1.7	21	S	-	0.5-0.75	<15
Guisante (seco)	2.5		ms		1.0-2.0	<15
Patata	1.7	12	MS	5.0-10	1.0-2.0	
Colza	10.5	13.5	T			
Arroz	11.4	10.8	MT			15-40
Sorgo (grano)	6.8	16	MT	10.0-20	4.0-6.0	15-40
Soja	5	20	MT			
Remolacha azucarera	7	5.9	T	>20	4.0-6.0	>40
Caña de azúcar (virgen)	1.7	5.9	MS			15-40
Girasol	5.5	25	MS	>20	0.75-1.0	
Tomate	2.5	9.9	MS	5.0-10	4.0-6.0	15-40
Trigo de invierno	6	7.1	MT	-	0.75-1.0	15-40

Tabla 22.2. Ejemplos de especies en los cuatro grupos de respuesta a la salinidad y parámetros típicos de la respuesta.

	Tolerante	**Moderadamente tolerante**	**Moderadamente sensible**	**Sensible**
EC_{eu} (dS/m)	6.0-10	3.0-6.0	1.3-3.0	0-1.3
B_s (típico) (%/(dS/m))	12	13	17	30
EC_e para cero rendimiento (dS/m)	<32	<24	<16	<8
Cultivos de grano, fibra y azúcar	Cebada	Cereales de invierno (trigo, avena, centeno, triticale)	Caña de azúcar	Judía
	Algodón	Leguminosas (caupí, soja)	Leguminosas (habas, cacahuete)	Guayule
	Remolacha azucarera	Sorgo	Cereales de verano (maíz, arroz, mijo)	Sésamo
		cártamo	Cultivos oleaginosos (castorbean, lino, girasol)	

Cultivos forrajeros	Centeno azul (algunas spp.)	Centeno azul (algunas spp.)	Alfalfa	
	Trigo(algunas spp.)	Trigo(algunas spp.)	Veza común	
	Grama	Cebada, trigo	Avena, centeno, maíz	
		Raigrás, festuca, pasto del Sudán	Bromus	
		Trébol (Melilotus spp.)	Trébol (Trifolium spp.)	
Cultivos hortícolas	Espárrago	Remolacha mesa	Solanáceas(patata, tomate, pimiento, berenjena)	Zanahoria
		Calabacín	Cucurbitáceas (pepino, melón, sandía, calabaza	Cebolla
			Brassicaceae (col, coliflor, repollo, nabo, brócoli)	Chirivía
			Otros (lechuga, espinaca, apio, rábano, batata)	
Frutas y frutos secos	Palmera datilera	Olivo, higuera, granado	Vid	Cítricos (naranja, limón, mandarina, etc.)
		Piña		Prunus spp. (melocotón, almendro, cereza, etc.)
		Papaya		Bayas (Rubus spp., Ribes spp.)
				Frutales de pepita (manzana, pera)
				Otros (fresas, aguacate)
				Frutas tropicales (chirimoya, mango, fruta de la pasión)

La información de la Tabla 22.1 tiene que ser empleada con precaución ya que la respuesta de las plantas varía con las etapas de desarrollo y las condiciones de cultivo (clima, suelo y manejo del riego y del cultivo, etc.). Además, hay que señalar que los datos de la Tabla 22.1 se determinaron con riego de superficie siguiendo un manejo convencional, incluyendo la aplicación de exceso de agua para obtener una distribución uniforme y estable de concentración de sales en la zona radical. Sin embargo, la EC_e del suelo puede variar sustancialmente en el espacio y durante la estación de crecimiento, por lo que la aplicación de la ecuación 22.1 no es siempre válida, pero representaría la respuesta de un cultivo determinado a la aplicación uniforme, a largo plazo, de agua de riego con una determinada EC.

22.2.2. Toxicidad específica

La toxicidad se produce cuando ciertos iones son absorbidos por la planta y se acumulan en concentraciones lo suficientemente altas como para causar daños a los cultivos. La toxicidad relacionada con las condiciones salinas se atribuye a los iones generalmente presentes en las sales solubles, principalmente Na y Cl, y a B, que se encuentra también con frecuencia en las aguas de riego salinas. Los primeros síntomas son generalmente quemaduras marginales en las hojas y clorosis. La sensibilidad de los cultivos a la toxicidad de iones es bastante variable, siendo los árboles frutales los más sensibles, pudiendo ser afectados por concentraciones muy bajas de iones (véase la Tabla 22.1). Bajo alta demanda evaporativa la acumulación de iones es más rápida, lo que aumenta el efecto tóxico.

La toxicidad también puede ser debida a la absorción directa de Cl o Na través de las hojas (p.ej. en riego por aspersión). Esto puede ser un problema importante en ciertos cultivos sensibles como los cítricos.

22.3. LOS SISTEMAS DE RIEGO Y LA DISTRIBUCIÓN DE SALES

En general, las sales se acumulan en suelos donde la lixiviación es limitada, es decir, tienden a concentrarse cerca de la superficie del suelo, y la profundidad a la que se acumulan depende de la cantidad de agua de drenaje. La falta de drenaje provoca la acumulación de una capa freática cerca de la superficie desde la que se evapora el agua, con lo que las sales se mueven hacia las capas superiores del suelo causando la salinización. Esto se muestra en la Figura 22.1, donde una capa freática de agua salina a una profundidad de 100 cm y EC = 10 dS/m es la fuente de agua que se evapora, dando como resultado una alta concentración de sales en la superficie. Una situación de este tipo también se ha producido en zonas agrícolas de secano, por ejemplo, en la cuenca del Murray y otras áreas en Australia. La sustitución de los bosques de hoja perenne que tienen altas tasas de ET por cultivos anuales que usan menos agua, ha cambiado la hidrología de las cuencas, lo que lleva a la acumulación del exceso de agua en las tierras bajas donde la capa freática se ha elevado con la consiguiente salinización del suelo. El problema es de tal magnitud que se

estima que en 50 años podría afectar al 25% de la superficie cultivada de Australia a menos que se adopten medidas concretas para paliarlo.

La Figura 22.2 muestra un perfil diferente de concentración de sales. En este caso las sales se acumulan en las capas más bajas debido a la lixiviación. Un período de fuertes lluvias durante el invierno ayudó en el lavado de sales y la EC disminuyó en todo el perfil del suelo. Este sería el perfil típico de sales en zonas semiáridas de riego sin la presencia de una capa freática.

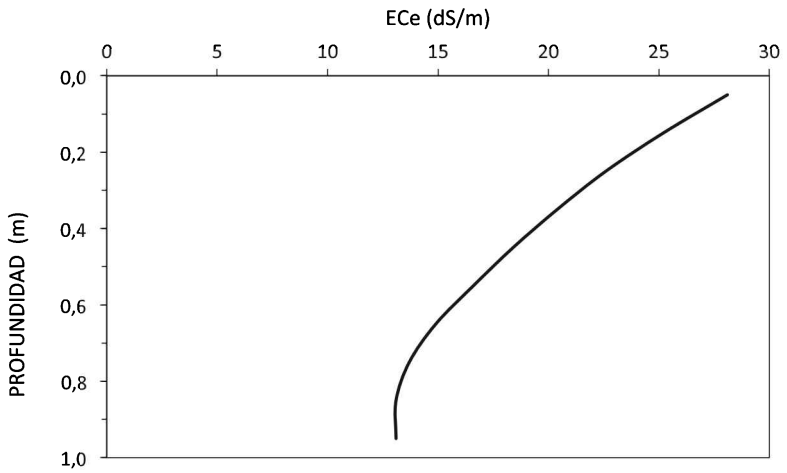


Figura 22.1. Perfil de salinidad del suelo por encima de capa freática de agua salina (EC_w = 10 dS/m) al final del ciclo de un cultivo de sorgo.

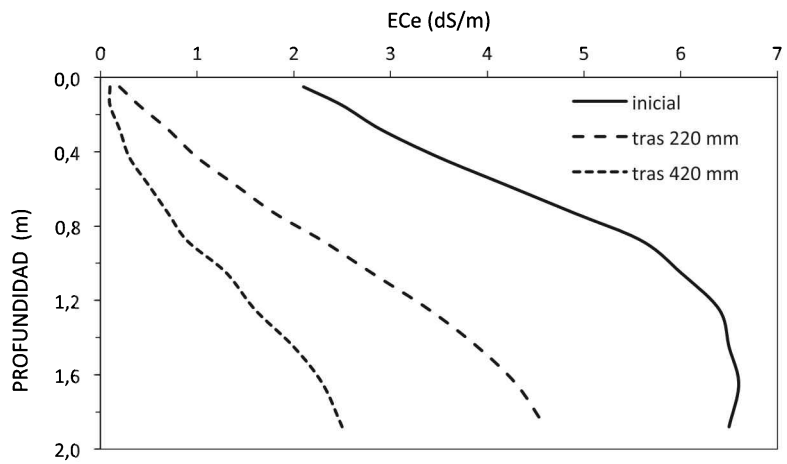


Figura 22.2. Perfiles de salinidad del suelo en un suelo franco arenoso antes (inicial) y después de 220 y 420 mm de lluvia.

Como el movimiento de las sales está relacionado con el del agua en el suelo, el método de riego afecta a la distribución de sales en el suelo. La Fig. 22.3 muestra las zonas de mayor o menor concentración de sales en función del método de riego. El riego por surcos proporciona lavado en casi toda la superficie del terreno, excepto en los lomos. El riego por goteo moja sólo una parte del suelo y por lo tanto el lavado se produce sólo bajo los emisores, mientras que el resto de la superficie tiende a acumular sales, particularmente en los bordes de los bulbos húmedos. Con riego por aspersión o por inundación se lavan las sales en todo el campo variando en función de la uniformidad de riego.

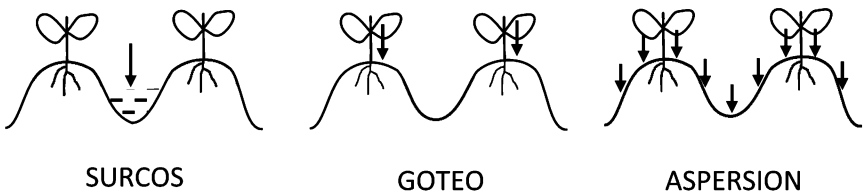


Figura 22.3. Acumulación de sales del agua de riego para diferentes métodos de riego. Adaptado de Rhoades y Loveday (Stewart y Nielsen, 1990).

La EC de la solución del suelo aumenta a medida que el agua del suelo se agota por lo que el efecto osmótico de las sales depende del contenido de agua del suelo. Esto se ilustra en la Figura 22.4, donde los cambios en la EC de la solución del suelo son paralelos a los cambios en el potencial de agua en el suelo. La frecuencia de riego también afecta a la concentración de las sales. El riego de alta frecuencia mantiene un alto contenido de agua del suelo y por lo tanto es capaz de mantener una con-

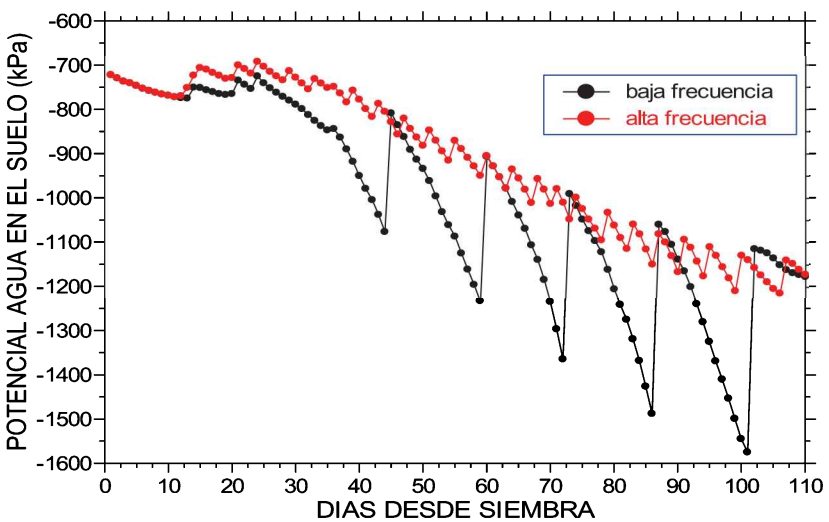


Figura 22.4. Evolución temporal del potencial de agua del suelo de un cultivo de sorgo regado con agua de EC_w = 4 dS/m con fracción de lavado 0.2 y frecuencia baja o alta de riego.

centración de sal más baja en la solución del suelo. Además, un contenido relativamente constante y alto de agua en el suelo contribuye a contrarrestar el efecto de la salinidad sobre el potencial de agua evitando bajos potenciales matriciales en el suelo. Por el contrario, el riego de baja frecuencia implica ciclos de secado como los mostrados en la Figura 22.4, que puede conducir a potenciales de agua del suelo muy bajos. Esta es una razón por la que el riego por goteo en algodón con agua salina es ventajoso en comparación con el riego por surcos tradicional.

Las sales potencialmente dañinas en el suelo son las de las zonas donde hay absorción de las raíces. Esto debe tenerse en cuenta si llevamos a cabo un estudio de la salinidad del suelo en una parcela.

Un problema especial es el de las semillas y plántulas. Las semillas durante la germinación y las plántulas son especialmente sensibles a la salinidad por lo que el establecimiento del cultivo es la etapa más crítica para algunas especies, en particular bajo riego por surcos. La configuración del lecho de siembra, el diseño del sistema de riego y la distribución de las plantas puede tener un enorme impacto en el establecimiento del cultivo en condiciones salinas. La Figura 22.5 ilustra las diversas situaciones para cultivos regados por surcos. La siembra sobre camas planas con riego por surcos laterales conduce a una acumulación de sales en el centro de la cama. Esto se puede evitar mediante la ampliación de la cama y la creación de un pequeño surco en el medio para separar las dos filas centrales. La situación puede mejorarse aún más si se realiza la siembra en camas inclinadas con un surco central que se riega hasta el establecimiento del cultivo.

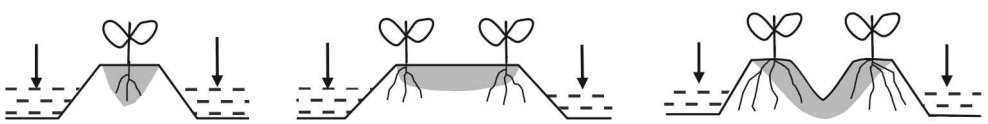


Figura 22.5. Efectos de la forma de la cama y la distribución de las plantas sobre la acumulación de sales y la emergencia de los cultivos bajo riego por surcos. Adaptado de Rhoades y Loveday (Stewart y Nielsen, 1990).

En suelos sódicos (véase 2.4.4), se forman costras superficiales que impiden la emergencia. Esto puede ser aliviado mediante riego por aspersión (dosis pequeñas, de alta frecuencia) que además reduciría la concentración de sales cerca de las semillas. Alternativamente, la eliminación mecánica de la costra en las hileras de cultivo puede ser beneficiosa aunque no es práctico a excepción de en pequeñas parcelas.

22.4. EL BALANCE DE SALES Y LA FRACCIÓN DE LAVADO

Para cuantificar el riesgo de salinización del suelo es necesario evaluar su balance de sales. Este balance implica que la cantidad de sales que entra en el sistema, menos la cantidad que sale, debe ser igual al aumento en el contenido de sales del suelo (ΔS):

$$V_wC_w+V_rC_r+S_s+S_f-(V_dC_d+S_p+S_c)=\Delta S \quad (22.2)$$

donde V y C se refieren a volumen y concentración, respectivamente, correspondiente al agua de riego (w), lluvia (r) y agua de drenaje (d). S_s, S_f, S_p y S_c se refieren a las cantidades de sales liberadas desde el suelo (por disolución o meteorización), proporcionadas como fertilizante, precipitadas y absorbidas por el cultivo, respectivamente, durante el período.

Para evitar la salinización del suelo la cantidad total de sales en el suelo debe ser constante ($\Delta S = 0$). Con el fin de simplificar la ecuación 22.2, suponiendo $S_s+S_f=S_p+S_c$ e ignorando el término relacionado con la precipitación, se puede escribir:

$$V_wC_w=V_dC_d \quad (22.3)$$

Por otro lado, la fracción de lavado (LF) se define como el cociente entre el volumen de drenaje y el volumen de riego. Utilizando la Ecuación 22.3, y sustituyendo concentraciones por valores de EC, LF se puede expresar como:

$$LF=V_d/V_w=EC_w/EC_d \quad (22.4)$$

Ejemplo 22.1.

La conductividad eléctrica del agua de riego es de 1 dS/m. El drenaje es el 30% del riego aplicado. La fracción de lavado es, pues, 0.25 y la EC del agua de drenaje se obtiene dividiendo EC_w por 0.25, es decir, EC_d = 4 dS/m.

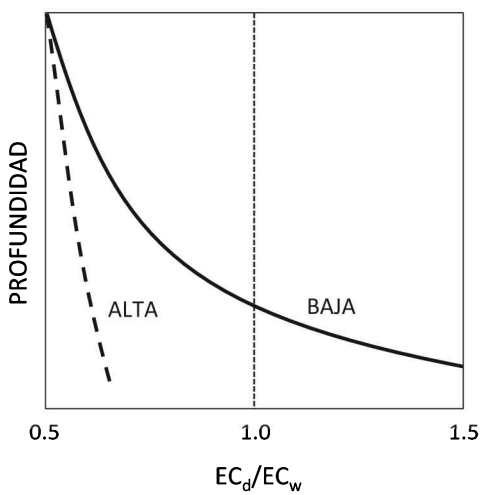


Figura 22.6. Perfiles genéricos de salinidad del suelo para alta o baja fracción de lavado. La salinidad se muestra como cociente entre EC_e y EC del agua de riego.

Por lo tanto, al cambiar la LF, es posible controlar la concentración de sales en el suelo dentro de los valores por encima de la concentración de sal en el agua de riego. Esto se muestra en la Figura 22.6 para diferentes fracciones de lavado. Se puede observar que la EC del suelo aumenta con la profundidad, teniendo valores similares a los del agua de riego en la parte superior. A medida que disminuye LF esta variación con la profundidad es más pronunciada.

22.5. PERFILES DE SALINIDAD Y RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS

Los perfiles de la EC en el suelo se ven afectados por la EC del agua de riego y la LF como hemos visto anteriormente. Esta EC se refiere al suelo a capacidad de campo. Para convertir a la EC del extracto de saturación (que se requiere para aplicar la Ec. 22.1) se utiliza un factor de 0.5, ya que EC_e es aproximadamente la mitad de la EC a capacidad de campo (EC_{FC}).

Ahora vamos a mostrar cómo varía la EC con la profundidad en el suelo con el siguiente ejemplo.

Ejemplo 22.1.

Un cultivo de judía (EC_{eu}=1.0 dS/m, B_s=19 %/dS/m) se riega con agua de 1.5 dS/m con una fracción de lavado de 0.2. Suponemos una distribución de la absorción de agua del tipo 40-30-20-10 (el suelo se divide en 4 partes de igual profundidad de donde se extrae el 40, 30, 20 y 10% de la extracción total de agua, respectivamente).

Por cada 100 mm aplicados como riego, 80 mm son absorbidos por el sistema radical y se drenan 20 mm. Aplicando la ecuación 22.4 para cada una de las cuatro capas en las que hemos dividido el perfil podemos deducir la EC media (a capacidad de campo) para cada capa.

En la primera capa la absorción de agua es del 40% del total (0.4 x 80 mm) por lo que la cantidad de agua que drena de esta capa es la diferencia entre el agua aplicada (100 mm) y la absorbida, es decir, el drenaje será 100-32 = 68 mm. Por lo tanto para la primera capa, LF y la EC calculada son:

$$LF_{0\text{-}1} = (100 - 0.4\,80)/100 = 68/100 = 1.5/EC_{FC1};\ EC_{FC1} = 2.2$$

Y para las otras capas:

$$LF_{1\text{-}2} = (68 - 0.3\,80)/68 = 44/68 = 2.2/EC_{FC2};\ EC_{FC2} = 3.4$$

$$LF_{2\text{-}3} = (44 - 0.2\,80)/44 = 28/44 = 3.4/EC_{FC3};\ EC_{FC3} = 5.35$$

$$LF_{3\text{-}4} = (28 - 0.1\,80)/28 = 20/28 = 5.35/EC_{FC4};\ EC_{FC4} = 7.5$$

Los valores de la EC del extracto de saturación serán la mitad de esos valores: 1.1, 1.7, 2.7 y 3.75 dS/m.

La media aritmética de EC_e será 1.93 dS/m.

La EC media ponderada por la absorción de agua será:

$$0.4\ (0.75{+}1.1)/2{+}\ 0.3\ (1.1{+}1.7)/2 + 0.2\ (1.7{+}2.7)/2 + 0.1\ (2.7{+}3.75)/2 = 1.56\ \text{dS/m}$$

Si utilizamos la media ponderada que se recomienda para el riego de alta frecuencia predecimos un rendimiento relativo del 89% del máximo. Usando la media aritmética (recomendado para el riego de baja frecuencia predecimos un rendimiento relativo del 82%).

Es posible deducir analíticamente el perfil de EC del suelo y calcular entonces los valores medios de la EC en función de la EC del agua de riego y la LF (Figura 22.7.):

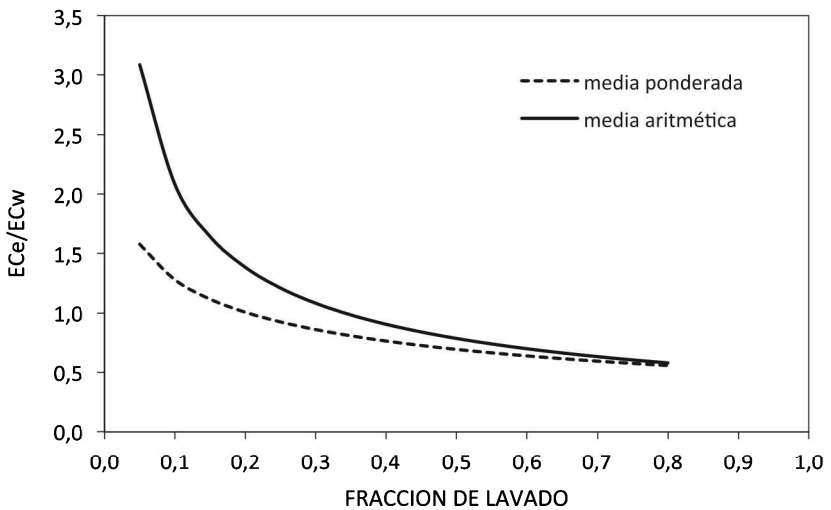


Figura 22.7. Salinidad media del suelo (relativa a la EC del agua de riego) en función de la fracción de lavado, calculada como media ponderada por absorción radical o media aritmética.

a) La EC media ponderada por absorción radical no depende de la distribución de la absorción de agua por la raíz y se puede calcular como:

$$EC_{em1} = 0.5\ EC_w \frac{\ln\ (LF)}{1 - LF} \tag{22.5}$$

b) Si la absorción de agua disminuye linealmente con la profundidad como en el ejemplo 22.3 la media aritmética será:

$$EC_{em2} = EC_w \frac{arc\cos\sqrt{LF}}{\sqrt{LF\ (1 - LF)}} \tag{22.6}$$

donde la función arccos se expresa en radianes.

Una ecuación más simple puede ser deducida de la ecuación de necesidades de lavado (ver más abajo) que se encuentra normalmente en libros sobre salinidad:

$$EC_{em2} = EC_w \frac{1 + LF}{5\ LF} \tag{22.7}$$

Ejemplo 22.1.

Siguiendo el Ejemplo 22.3 del cultivo de judía (EC_{eu}=1.0 dS/m, B_s=19 %/dS/m) regada con agua de EC_w= 1.5 dS/m y LF = 0.2 podemos evaluar la EC_e media usando las ecuaciones 22.5 y 22.7.

Media ponderada:

$$EC_{em} = -0.5\ EC_w \ln(LF)/(1-LF) = -0.5\ 1.5\ \ln(0.2)/0.8 = 1.51 dS/m$$

El rendimiento relativo sería:

$$\frac{Y}{Y_x} = 1 - \frac{B_s}{100}(EC_e - EC_{eu}) = 1 - \frac{19}{100}(1.51 - 1) = 0.90$$

El resultado sería muy parecido al obtenido usando un método numérico (Ejemplo 22.3).

Media aritmética:

$$EC_{em2} = EC_w \frac{1 + LF}{5\ LF} = 1.5\ \frac{1 + 0.2}{5 \cdot 0.2} = 1.8\ dS/m$$

Y el rendimiento esperado (como fracción del máximo) es:

$$\frac{Y}{Y_x} = 1 - \frac{B_s}{100}(EC_e - EC_{eu}) = 1 - \frac{19}{100}(1.8 - 1) = 0.85$$

22.6. NECESIDAD DE LAVADO

La necesidad de lavado (LR) es la fracción de lavado necesaria para mantener una EC_e deseada (EC_{em}) y depende de la sensibilidad del cultivo (Ec. 22.1) y de la EC del agua de riego. Una vez conocida la LR, la cantidad de riego a aplicar será:

$$AW = \frac{ET}{1 - LR} \tag{22.8}$$

El LR se podría obtener mediante la resolución de las ecuaciones 22.5 y 22.6 de cálculo de LF pero ninguna solución analítica es posible. Se usan entonces ecuaciones aproximadas:

Para riego de baja frecuencia:

$$LR = 0.31 \left(\frac{EC_w}{EC_{em}}\right)^{1.7} \tag{22.9}$$

O, alternativamente, la siguiente ecuación se encuentra comúnmente en la literatura:

$$LR = \frac{EC_w}{5\,EC_{em} - EC_w} \tag{22.10}$$

Para riego de alta frecuencia:

$$LR = 0.18 \left(\frac{EC_w}{EC_{em}}\right)^{3} \tag{22.11}$$

Ejemplo 22.1.

Un cultivo de cebada se riega con agua de EC_w= 5 dS/m. Para alcanzar un rendimiento relativo del 90% del máximo debemos tener conseguir una EC_e media que satisfaga la siguiente ecuación:

$$90 = 100 - 5.0\ (EC_{em} - 8.0)$$

De donde se deduce EC_{em} = 10 dS/m.

Por lo tanto la LR para riego de alta frecuencia será:

$$LR = 0.18 \left(\frac{5}{10}\right)^{3} = 0.022$$

Y para riego de baja frecuencia:

$$LR = 0.31 \left(\frac{5}{10}\right)^{1.7} = 0.095$$

O

$$LR = \frac{5}{5\,x\,10 - 5} = 0.11$$

Ejemplo 22.1.

Una finca tiene una cantidad limitada de agua de riego de un canal (EC = 0.4 dS/m). También cuenta con un pozo de suministro ilimitado de agua con 2.5 dS/m. Queremos cultivar pimiento (EC_{eu} = 1.5, B = 14) con un sistema de riego de baja frecuencia que tiene una fracción de lavado LF = 0.2. ¿Cómo se puede ampliar la superficie regada usando agua del pozo?

Usando sólo el agua del canal:

$$EC_{em} = EC_w \frac{1 + LF}{5\ LF} = 0.4\ \frac{1 + 0.2}{5\ x\ 0.2} = 0.48\ dS/m$$

Este valor es inferior al umbral de EC (1.5 dS/m) por lo que el rendimiento sería máximo.

Con agua del pozo:

$$EC_{em} = 2.5\ \frac{1 + 0.2}{5\ x\ 0.2} = 3.0\ dS/m$$

Y el rendimiento relativo sería:

$$\frac{Y}{Y_x} = 1 - \frac{B_s}{100}(EC_e - EC_{eu}) = 1 - \frac{14}{100}(3 - 1.5) = 0.79$$

Los dos aguas podrían ser mezcladas para obtener una determinada EC_{em}. Por ejemplo, si queremos obtener el máximo rendimiento, la EC_{em} debería ser de 1.5 dS/m, lo que implica la siguiente ecuación:

$$[f\ EC_{pozo} + (1 - f)EC_{canal}]\frac{1 + LF}{5\ LF} = 1.5$$

Donde f es la fracción de agua tomada del pozo. En nuestro caso podemos deducir f = 0.4, es decir, mediante la mezcla de 60% de agua del canal y el 40% de agua del pozo, podríamos alcanzar el rendimiento máximo, y al tiempo aumentar la superficie de riego en un 67%.

También podríamos cambiar la LF. Por ejemplo, mediante el aumento de LF hasta 0.3 podríamos utilizar un 63% de agua del pozo lo que aumentaría aún más la superficie regada.

22.7. NECESIDAD ÓPTIMA DE LAVADO

A partir de las secciones anteriores, es evidente que para mantener la productividad de los cultivos podemos aumentar la LF, y por lo tanto aplicar más agua. En otras palabras, el agua de riego de mala calidad (alta EC_w) es equivalente a tener una menor cantidad de agua dulce en términos de productividad de los cultivos.

En la sección anterior se determinó la necesidad de lavado cuando se conoce el rendimiento objetivo. Esto puede conducir a valores anormalmente elevados de LR cuando la EC y el coste del agua de riego son altos. En este caso podemos estar interesados en maximizar la productividad del agua (CWP, rendimiento por unidad de riego aplicado). Para ello podemos aplicar la ecuación 22.1 para diferentes valores de LR hasta encontrar el máximo de CWP. En el caso de riego de baja frecuencia también es posible deducir una solución analítica para LR_{opt} (valor de LR al que se maximiza CWP) mediante la maximización de la función:

$$f(LR) = (1 - LR)\left\{1 - 0.01\, B_s \left[EC_w \frac{1+LR}{5\, LR} - EC_{eu}\right]\right\} \tag{22.12}$$

La función se maximiza cuando:

$$LR_{opt} = \sqrt{\frac{0.002\, B' EC_w}{1+B'(EC_{eu}-0.002 EC_w)}} < \frac{1}{5\frac{EC_{eu}}{EC_w}-1} \tag{22.13}$$

Como indica la desigualdad, la solución es válida por debajo del valor de LR a la que se consigue el máximo rendimiento.

Ejemplo 22.7.

Queremos regar melocotón (EC_{eu} = 1.7, B_s = 21) con agua de riego de EC_w = 3 dS/m.

Utilizando la ecuación 22.13 deducimos LR_{opt} = 0.35. La solución es válida, ya que es más bajo que el límite de LR para obtener el máximo rendimiento:

Si tuviéramos agua con EC_w = 1 dS/m, se deduce LR_{opt} = 0.18 pero ahora se supera el valor límite (0.13). Por lo tanto en ese caso el LR óptimo sería 0.13.

Los análisis anteriores se basan en una concentración constante de sales en la solución del suelo que se alcanza después de un uso continuo de una determinada agua de riego. Sin embargo, la EC_e puede cambiar durante la campaña y de un año a otro. Por ejemplo, en áreas mediterráneas las precipitaciones se concentran en invierno contribuyendo al lavado de sales (al menos parcial, dependiendo de la cantidad) y por lo tanto a EC_e inferior al valor de estado estacionario. Por lo tanto el cálculo de necesidad de lavado basado en las ecuaciones que hemos visto en este capítulo conduce a un límite superior para LR. La LR deseada podría variar dependiendo de la cantidad de lixiviación de invierno, y por lo tanto, de la EC_e al comienzo de la campaña de riego, que debe ser medida de forma rutinaria para realizar un seguimiento de las tendencias de la salinidad del suelo.

22.8. SODICIDAD Y ESTRUCTURA DEL SUELO

Los suelos afectados por sodio, denominados suelos sódicos, son los que tienen altos niveles de Na adsorbido (intercambiable). El alto Na intercambiable promueve la dispersión de los coloides del suelo y por lo tanto la degradación de la estructura del suelo. Esta degradación implica un deterioro en la estabilidad de agregados, en la capacidad de transmisión de agua debido al sellado de la superficie, y una mayor probabilidad de formación de costras. Este último problema es especialmente relevante ya que, además de limitar el establecimiento del cultivo, afecta al balance de agua por la disminución de la infiltración y el aumento de la escorrentía, lo que aumenta el riesgo de erosión.

La formación de costras es la consecuencia de la ruptura de los agregados y del cierre de los poros en la superficie del suelo como resultado de un rápido humedecimiento del suelo acompañado de un efecto de dispersión por el impacto de las gotas de lluvia. En suelos sódicos el problema se agrava debido al efecto de dispersión del sodio, lo que conduce a una falta de estabilidad de los agregados y una gran reducción en la tasa de infiltración, con los consiguientes problemas de encharcamiento y aumento de la escorrentía.

Un suelo se clasifica como sódico cuando el porcentaje de sodio intercambiable (ESP) supera el 15% de la capacidad de intercambio catiónico. En la práctica, un indicador utilizado es la relación de adsorción de sodio (SAR, $meq^{0.5}/L^{0.5}$) en el extracto de saturación del suelo que es aproximadamente igual numéricamente a ESP:

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca+Mg}{2}}} \tag{22.14}$$

donde todas las concentraciones se expresan en meq/L.

El ESP puede ser estimado con mayor precisión en función del SAR en el extracto de saturación usando la ecuación empírica:

$$ESP = \frac{100\,(-0.0126 + 0.01475\,\cdot SAR)}{1 - 0.0126 + 0.01475\,\cdot SAR} \tag{22.15}$$

El SAR es un índice aplicado a las soluciones, y también al agua de riego. También se utiliza para evaluar el efecto del contenido de sodio del agua de riego en la estructura del suelo y la conductividad hidráulica debido a un exceso de sodio en relación con el calcio y el magnesio. Sin embargo, este efecto negativo depende de la EC del agua de riego ya que el efecto dispersante del sodio es contrarrestado por el efecto agregante de una alta concentración de sales en solución (Tabla 22.3). Además, es necesario tener en cuenta los cambios en Ca en el agua del suelo que se producen como resultado de la precipitación (como carbonato cálcico) o disolución durante o después del riego. El sodio permanece soluble y en equilibrio con el sodio de cambio del suelo en todo momento, mientras que la concentración de calcio, varía hasta que se alcanza el equilibrio. La disolución es promovida por la dilución y por el dióxido de carbono disuelto en la solución del suelo. La precipitación puede tener lugar cuando la presencia de calcio se acompaña de suficiente carbonato, bicarbonato o sulfato como para exceder la solubilidad del carbonato cálcico (caliza) o sulfato de calcio (yeso). Esta es la razón por la que hay que corregir el valor del SAR en el agua de riego para una estimación más realista de los efectos potenciales del agua de riego en la estructura del suelo y la conductividad hidráulica. La corrección más común se realiza mediante la estimación de una concentración de Ca corregida (Ca_x):

$$Ca_x = exp\left[0.552 + 0.1637\sqrt{EC_w} - 0.668\, ln\left(\frac{HCO_3 + CO_3}{Ca}\right)\right] \quad (22.16)$$

que se utiliza para calcular un SAR ajustado (que ahora se llama relación de sodio ajustado, SAR_x):

$$SAR_x = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca_x + Mg}{2}}} \quad (22.17)$$

Tabla 22.3. Criterios de calidad para el agua de riego

Problema potencial de riego Ninguna			Unidades	Grado de restricción del uso		
				Grave	De leve a moderada	Severa
La salinidad reduce el crecimiento del cultivo y la transpiración						
EC_w			dS/m	<0.7	0.7-3.0	> 3.0
Toxicidad específica de iones (afecta a los cultivos sensibles)						
	De sodio (riego por gravedad)		SAR	<3	3-9	> 9
	De sodio (riego por aspersión)		meq/L	<3	> 3	
	Cloruro (riego por gravedad)		meq/L	<4	4-10	> 10
	Cloruro (riego por aspersión)		meq/L	<3	> 3	
	Boro		mg/L	<0.7	0.7-3.0	> 3.0
La infiltración se reduce						
SAR	= 0-3	y EC_w	dS/m	> 0.7	0.7-0.2	<0.2
	= 3-6		dS/m	> 1.2	1.2-0.3	<0.3
	= 6-12		dS/m	> 1.9	1.9-0.5	<0.5
	= 12-20		dS/m	> 2.9	2.9-1.3	<1.3
	= 20-40		dS/m	> 5.0	5.0-2.9	<2.9
Efectos Varios						
	Bicarbonato (manchas de cal en aspersión)		meq/L	<1.5	1.5-8.5	> 8.5
	pH			Rango normal 6.5 a 8.4		

Ejemplo 22.7.

La composición del agua de riego es:

Ca: 1.3 meq/l, Mg: 1.6 meq/l, Na: 6.6 meq/l, CO_3: 0.4 meq/l, HCO_3: 4.00 meq/l, EC_r: 0.90 dS/m

La relación $(CO_3+HCO_3)/Ca$ es $(4.0+0.4)/1.3 = 3.38$

La concentración de Ca ajustada es:

$$Ca_x = exp\left[0.552 + 0.1637\sqrt{0.9} - 0.668\, ln(3.38)\right] = 0.90$$

Y el SAR ajustado es:

$$SAR_x = \frac{6.6}{\sqrt{\frac{0.9+1.6}{2}}} = 5.9$$

De acuerdo con la Tabla 22.3 que resume los posibles problemas relacionados con la calidad del agua de riego, esta agua no causaría problemas en términos de disponibilidad de agua, pero sí ligeros problemas de infiltración, efectos tóxicos en cultivos sensibles y leves a moderados problemas de manchas de cal si se aplica mediante riego por aspersión.

22.9. RECUPERACIÓN DE SUELOS SALINOS

En general, un suelo se clasifica como salino cuando su EC_e es mayor de 4 dS/m, aunque la Soil Science Society of America utiliza un umbral de 2 dS/m. Las sales solubles más comúnmente presentes son los cloruros y sulfatos de Na, Ca y Mg. El sodio y el cloro son los iones más dominantes, especialmente en suelos de alta salinidad, pero las concentraciones de Ca y Mg son generalmente suficientes para satisfacer las necesidades de los cultivos. Muchos suelos salinos contienen cantidades apreciables de yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), mientras que los carbonatos solubles nunca están presentes. El pH del extracto saturado de los suelos salinos es siempre inferior a 8.2 y por lo general cercano a 7.

Los suelos salinos generalmente tienen buenas propiedades físicas ya que el exceso de sales mantienen la arcilla en un estado floculado. Algunos suelos salinos, arcillosos muy pesados, tienden a dispersarse cuando se lavan con agua muy baja en sales.

Los suelos salinos pueden ser reconocidos por el crecimiento irregular de los cultivos (tamaño de la planta irregular, rodales sin plantas) y, a menudo por la presencia de costras de sal de color blanco sobre la superficie. Esto se debe a que siempre hay una gran variabilidad espacial en las propiedades del suelo que conduce a variaciones espaciales en la salinización del suelo. Si la salinidad es moderada y en los pocos casos en que es más uniforme en todo el campo, puede pasar desapercibida, ya que puede no causar síntomas visibles excepto una menor tasa de crecimiento y

un tinte verde-azulado en algunos casos. Los síntomas de estrés por salinidad pueden parecerse a los de déficit de agua sin marchitamiento debido al ajuste osmótico gradual. Los síntomas de toxicidad específicos (por quemadura marginal o en la punta de las hojas) son típicos en las plantas leñosas.

La recuperación de suelos salinos se realiza mediante el lavado de sales. La cuestión principal es la cantidad de agua requerida y la mejor estrategia de aplicación. La evacuación del agua de drenaje debe ser garantizada, y si es necesario se debe instalar una red de drenaje con ese fin.

Teóricamente, si el suelo se comportara como un medio poroso perfecto y suponiendo que no hay precipitación o disolución de sales, el cambio en la cantidad de sales almacenada en el suelo después de aplicar una cantidad de agua (AW) con EC_w viene dado por:

$$EC_{e\,final} = EC_{e\,init} \exp\left(\frac{-AW}{Z\,(\theta_{sat} - \theta_{init})}\right) + 0.5\,EC_w\left[1 - \exp\left(\frac{-AW}{Z\,(\theta_{sat} - \theta_{init})}\right)\right] \quad (22.18)$$

donde Z es la profundidad del suelo y los subíndices sat e init se refieren a condiciones de saturación e inicial, respectivamente.

Ejemplo 22.7.

El suelo tiene EC_e = 10 dS/m con drenajes a 1 m de profundidad. Aplicamos 1000 mm con EC_w = 0.1 dS/m cuando el suelo está en punto de marchitez (0.10 $m^3\ m^{-3}$). El contenido de agua del suelo en saturación es de 0.40 $m^3\ m^{-3}$.

$$EC_{e\,final} = 10 \exp\left(\frac{-1}{1\,(0.4 - 0.1)}\right) + 0.5\,EC_w\left[1 - \exp\left(\frac{-1}{1\,(0.4 - 0.1)}\right)\right]$$
$$= 0.357 + 0.048 = 0.40\ dS/m$$

Se han propuesto varios modelos empíricos para estimar el volumen de agua requerido. Cada suelo se diferencia en su comportamiento y la misma cantidad de agua tiene diferentes eficiencias de lixiviación en suelos diferentes, por lo que usualmente se realizan experimentos de campo para determinar la cantidad de agua requerida. Hemos visto antes (Ejemplo 22.9) que una cantidad de agua igual a la profundidad de suelo, podría lavar teóricamente el 96% de las sales. Sin embargo en la práctica una cantidad tal, que es equivalente a 1.5-2 veces el volumen de poros, elimina sólo alrededor del 70% de las sales solubles.

El riego por aspersión es más eficiente en el lavado de sales que el riego superficial. Esto se debe principalmente al flujo preferencial que ocurre bajo condiciones de saturación, dejando parte de la tierra sin lavado. Por la misma razón, la aplicación intermitente de riego de superficie es más eficiente (aunque lenta) que la aplicación continua. Para el cálculo de la profundidad de agua requerida (I_w, mm) para lavar

una profundidad Z de suelo (mm) pasando de una EC inicial (EC_{init}) a una EC final deseada EC (EC_{final}) podemos utilizar la siguiente fórmula:

$$\frac{I_w}{Z} = k_{leach} \frac{EC_{e\ init} - 0.5\ EC_w}{EC_{e\ final} - 0.5\ EC_w} \tag{22.19}$$

donde el parámetro k_{leach} depende de las propiedades del suelo (contenido de agua del suelo en saturación y textura) y el método de riego. Para encharcamiento continuo k_{leach} = 0.45 en suelos de turba, 0.30 en suelos francos arcillosos y 0.1 en franco arenosos. Para encharcamiento intermitente o riego por aspersión k_{leach} = 0.10.

Ejemplo 22.7.

El suelo tiene EC_e = 10 dS/m con drenes a 1 m de profundidad. Tenemos la intención de recuperar toda la profundidad del suelo (Z = 1000 mm) para llegar a una EC final de 2 dS/m utilizando riego por aspersión (por lo que k_{leach} = 0.1) y agua con EC_w = 1 dS/m. Usando la ecuación 22.18:

$$\frac{I_w}{Z} = k_{leach} \frac{EC_{e\ init} - 0.5\ EC_w}{EC_{e\ final} - 0.5\ EC_w} = 0.1\ \frac{10 - 0.5 \cdot 1}{2 - 0.5 \cdot 1} = 0.633$$

Por lo tanto la cantidad de riego a aplicar será de 633 mm.

En el caso de suelos salinos-sódicos la adición de yeso puede ayudar en la mejora de la infiltración y por lo tanto acelerar tanto la desalinización como la eliminación del sodio del suelo, en especial en suelos de textura pesada, o cuando se aplica agua con pocas sales. La aplicación de enmiendas debe testarse con ensayos a escala experimental para grandes proyectos de recuperación de suelos.

22.10. RECUPERACIÓN DE SUELOS SÓDICOS

La principal característica de los suelos sódicos es el alto contenido de Na intercambiable que afecta negativamente a las propiedades del suelo y al crecimiento de la mayoría de las especies cultivadas. Por definición, los suelos sódicos son los que tienen un porcentaje de sodio intercambiable mayor que 15. En muchos casos, la EC_e no es demasiado alta (menor de 4 dS/m). El pH es 8.2 o superior y en casos extremos puede estar por encima de 10.5. La materia orgánica dispersada y disuelta en la solución del suelo se puede depositar sobre la superficie del suelo por evaporación, generando una superficie oscura, por lo que estos suelos también se han denominado suelos sódicos negros.

El objetivo de la recuperación de un suelo sódico será la disminución de la cantidad de Na en el complejo de cambio y/o aumentando la cantidad de Ca. La lixiviación de Na sola puede ser difícil debido a la baja permeabilidad de los suelos sódicos. Esto

se puede mejorar mediante la adición de electrolitos (enmiendas químicas añadidas al agua de riego) y laboreo.

El calcio se añade normalmente como cloruro de calcio, carbonato de calcio o yeso, siendo este último el más utilizado. La disponibilidad de yeso se ha incrementado en los últimos años, ya que es el subproducto de la eliminación de gases de dióxido de azufre de las emisiones de las plantas eléctricas de carbón. Aunque el yeso no es un agente para el encalado, reduce la toxicidad de aluminio que a menudo acompaña a la acidez del suelo.

Las enmiendas de yeso se aplican normalmente a voleo y luego se incorporan al suelo mediante grada de discos o vertedera. El yeso molido muy fino se solubiliza rápidamente. Cuando el problema principal es una costra superficial, las necesidades de yeso son muy reducidas. Si el problema está en las capas más profundas, las contribuciones de yeso deben ser mucho mayores. El yeso se puede aplicar también disuelto en el agua de riego lo que aumenta la eficiencia.

En general, el proceso de regeneración con yeso se realiza en varias etapas. La práctica común es hacer una primera aplicación de aproximadamente 10 t/ha de yeso en el primer año con 1.5 m de agua. En los años siguientes (2 o 3) se pueden realizar aplicaciones de yeso de 4 t/ha acompañadas por algo de lavado.

Según el USDA la cantidad de yeso a aplicar (kg/ ha) puede calcularse como:

$$Cantidad\ de\ yeso = 860 \cdot F_g \rho_b\ Z\ CEC\ (SAR_i - SAR_f) \tag{22.20}$$

donde ρ_b es la densidad aparente del suelo (t/m^3), Z es la profundidad del suelo (m) a corregir, CEC es la capacidad de intercambio catiónico (mmol/ kg), SAR_i y SAR_f son los valores inicial y final de SAR en el extracto de saturación del suelo, respectivamente, y F_g es un factor de eficiencia que varía de 1.1 (SAR_f = 0.15) a 1.3 (SAR_f = 0.05).

Ejemplo 22.7.

La densidad aparente del suelo es de 1.3 t/m^3 , la CEC es de 400 mmol/ kg. El SAR inicial es de 0.20 y queremos un valor final de 0.10. La cantidad de yeso para recuperar la capa superior del suelo de 0.3 m será:

$$Cantidad\ de\ yeso = 860\ F_g \rho_b\ Z\ CEC\ \left(SAR_i - SAR_f\right)$$
$$= 860 \cdot 1.2 \cdot 1.3 \cdot 0.3 \cdot 400 \cdot (0.2 - 0.10) = 16099\ kg/ha$$

BIBLIOGRAFÍA

Ayers RS, Westcott DW (1989) Water Quality for Agriculture, FAO Irrigation and Drainage Paper 29 rev 1. FAO, UN, Rome

Suarez DL (2001) Sodic soil reclamation: Modelling and field study. Aust J Soil Res, 39: 1225–1246

Mass EV (1996) Crop salt tolerance. In: Tanji KK (ed) Agricultural salinity assessment and management. American Society of Civil Engineers, New York.

Apéndice 22.1. Sensibilidad de diferentes especies cultivadas a la salinidad

Para la respuesta a la salinidad se muestran dos parámetros: EC_{eu} (dS/m) es el valor de EC_e por debajo del cual el rendimiento no se ve afectado. B_s (%/ (dS/m)) es la pendiente de la relación lineal entre el rendimiento (% del máximo) y EC_e. Los cultivos se clasifican como sensibles (S), moderadamente sensibles (MS), moderadamente tolerantes (MT) y tolerantes (T). En relación con el daño foliar por riego por aspersión, se muestra la concentración umbral de Na o Cl (meq/L). La concentración máxima de B (mg/L en el extracto saturado del suelo) y Na (ESP,%) en el suelo por encima del cual se puede producir toxicidad también se muestran. Adaptado de Ayers y Wescott (1989).

Cereales y pseudocereales	Respuesta a la salinidad			Toxicidad		
	EC_{eu}	B_s	Tipo	Na o Cl en agua	B en suelo	Na en suelo (ESP)
	dS/m	dS/m/%		meq/L Na o Cl	mg/L extracto saturado	%
Cebada, grano	8	5	T	10.0-20	0.75-1.0	>40
Maíz (grano, dulce)	1.7	12	MS	10.0-20	2.0-4.0	<15
Mijo			MS			
Avena	5	20	MT		2.0-4.0	15-40
Arroz	3	12.2	S			15-40
Centeno	11.4	10.8	MT			15-40
Sorgo	6.8	16	MT	10.0-20	4.0-6.0	15-40
Trigo	6	7.1	MT	-	0.75-1.0	15-40
Trigo duro	5.9	3.8	T	-	0.75-1.0	15-40

Forrajes	Respuesta a la salinidad			Toxicidad		
	EC_{eu}	B_s	Tipo	Na o Cl en agua	B en suelo	Na en suelo (ESP)
	dS/m	dS/m/%		meq/L Na o Cl	mg/L extracto saturado	%
Alfalfa	2	7.3	MS	10.0-20	4.0-6.0	>40
Cebada, forraje	6	7	T	10.0-20		
Cebada, heno	6	7.1	T	10.0-20		
Grama	6.9	6.4	T			>40
Trébol (rojo)	1.5	12	MS			
Trifolium alexandrinum	2	10.3	MS			15-40
Trébol (blanco)	1.5	12	MS	-	2.0-4.0	15-40
Caupí (vegetativo)	2.5	11	MS			
Festuca	3.9	5.3	MT			15-40
Eragrostis	2	8.5	MS			
Maíz (forraje)	1.8	7.4	S	10.0-20		
Alopecurus pratensis	1.5	9.7	MS			
Dactylis	1.5	6.2	MS			
Paspalum	1.8	9	MS			15-40
Phalaris	4.2		MT			
Lolium	5.6	7.6	MT			15-40
Sesbania	2.3	7	MS			
Setaria	2.4	12.2	MS			
Siratro	2	7.9	MS			
Pasto del Sudán	2.8	4.3	MS			
Townsville stylo	2.4	20.4	MS			
Lotus pedunculatus	3	11.1	MS			
Lotus corniculatus	5	10	MT			
Veza	3	11	MS		4.0-6.0	15-40
Agropiron cristatum	3.5	4	MT			>40
Agropiron cristatum (fairway)	7.5	6.9	T			>40
Tynopirum ponticum	7.5	4.2	T			>40

Arboles frutales, vides y arbustos	Respuesta a la salinidad			Toxicidad		
	EC_{eu}	B_s	Tipo	Na o Cl en agua	B en suelo	Na en suelo (ESP)
	dS/m	dS/m/%		meq/L Na o Cl	mg/L extracto saturado	%
Almendro	1.5	18	S	<5		<15
Manzano	1	18	S			<15
Albaricoque	1.6	24	S	<5	0.5-0.75	<15
Aguacate	1.3	21	S	-	0.5-0.75	<15
Platanera			MS			
Moral	1.5	22	S		<0.5	<15
Zarza	1.5	22	S			<15
Cereza	-	-	S	<5	0.5-0.75	<15
Cocotero			MT			
Palmera datilera	4	3.6	T			
Higuera	4.2		MT		0.5-0.75	<15
Vid	1.5	9.5	MS	5-10.0	0.5-0.75	
Pomelo	1.8	16	S	<5	0.5-0.75	<15
Limonero	1	-	S	<5	<0.5	<15
Naranja	1.3	16	S	<5	0.5-0.75	<15
Melocotón	1.7	21	S	-	0.5-0.75	<15
Peral	1		S			<15
Piña			MT			
Ciruelo	1.5	18.2	S		0.5-0.75	<15
Granado	4		MT			
Ciruelo (pasas)	1.5	18	S	<5		<15
Frambuesa	1		S			<15
Romero	4.5		MT			
Nogal			S		0.5-0.75	<15

Cultivos hortícolas	Respuesta a la salinidad			Toxicidad		
	EC_{eu}	B_s	Tipo	Na o Cl en agua	B en suelo	Na en suelo (ESP)
	dS/m	dS/m/%		meq/L Na o Cl	mg/L extracto saturado	%
Alcachofa	6.1	11.5	MT		2.0-4.0	
Espárrago	4.1	2	T		6.0-15.0	
Judía (verde)	1	18.9	S			<15
Remolacha (mesa)	4	9	MT	>20	4.0-6.0	>40
Haba	1.6	9.6	MS			
Brócoli	2.8	9.1	MS			
Coles de Bruselas	1.8	9.7	MS			
Repollo	1.8	9.7	MS	-	2.0-4.0	
Coliflor	1.8	6.2	MS	>20		
Apio	1.8	6.2	MS		2.0-4.0	
Pepino	2.5	13	MS	10.0-20	1.0-2.0	
Berenjena	1.1	6.9	MS			
Col rizada	6.5		T			
Lechuga	1.3	13	MS	-	2.0-4.0	15-40
Melón	2.2	7.3	MS	-	2.0-4.0	
Guisante	2.5		ms		1.0-2.0	<15
Pimiento	1.5	14	MS	5.0-10	1.0-2.0	
Calabaza	1.2	13	MS			
Rábano	1.2-2.0	7.6-13.0	MS		1.0-2.0	15-40
Espinaca	2.0-3.2	7.7-16.0	MS			15-40
Squash	2.5		MT		2.0-4.0	
Calabacín, scallop	3.2	16	MS			
Calabacín, Zucchini	4.7	10	MT			
Fresa	1	33	S	-	0.75-1.0	
Tomate	2.5	9.9	MS	5.0-10	4.0-6.0	15-40
Sandía	-	-	MS			

Leguminosas	Respuesta a la salinidad			Toxicidad		
	EC_{eu}	B_s	Tipo	Na o Cl en agua	B en suelo	Na en suelo (ESP)
	dS/m	dS/m/%		meq/L Na o Cl	mg/L extracto saturado	%
Garbanzo			MS			<15
Caupí (semilla)	4.9	12	MT		0.5-0.75	<15
Judía (seca)	1	19	S	-	0.75-1.0	
Haba	1.6	9.6	MS			
Guisante	1.5	14	S		1.0-2.0	<15
Cacahuete	3.2	29.4	MS	-	0.75-1.0	<15
Soja	5	20	MT			

Raíces, tubérculos y bulbos	Respuesta a la salinidad			Toxicidad		
	EC_{eu}	B_s	Tipo	Na o Cl en agua	B en suelo	Na en suelo (ESP)
	dS/m	dS/m/%		meq/L Na o Cl	mg/L extracto saturado	%
Zanahoria	1	14	S	-	1.0-2.0	15-40
Cebolla	1.2	16.1	S	-	0.5-0.75	15-40
Chirivía	-	-	S			
Patata	1.7	12	MS	5.0-10	1.0-2.0	
Batata	1.5	11.1	MS		0.75-1.0	
Nabo	0.9	9	MS		2.0-4.0	
Mandioca			MS			
Ajo	3.9	14.3	MS		0.75-1.0	

Cultivos de azúcar, aceite y fibra	Respuesta a la salinidad			Toxicidad		
	EC_{eu}	B_s	Tipo	Na o Cl en agua	B en suelo	Na en suelo (ESP)
	dS/m	dS/m/%		meq/L Na o Cl	mg/L extracto saturado	%
Algodón	7.7	5.2	T	>20	6.0-15.0	>40
Ricino	-	-	MS			
Lino	1.7	12	MS			

Kenaf	8.1	11.6	T			
Olivo	5.00	7	MT			
Colza	10.5	13.5	T			
Cártamo	6.5		MS	10.0-20		
Sésamo			S	10.0-20	0.75-1.0	
Remolacha azucarera	7	5.9	T	>20	4.0-6.0	>40
Caña de azúcar	1.7	5.9	MS			15-40
Girasol	5.5	25	MS	>20	0.75-1.0	

Capítulo 23

Los fertilizantes

A. DELGADO
M. QUEMADA
F.J. VILLALOBOS

RESUMEN:

En este capítulo se revisa la clasificación y características principales de los fertilizantes. Entre los fertilizantes de nitrógeno, los nítricos y los amónicos son los más apropiados para aplicaciones de cobertera o de fondo, respectivamente, mientras que la urea se puede aplicar en ambos modos. Los fertilizantes de fósforo se distinguen principalmente por su solubilidad, lo que determina la forma de aplicación. Los fertilizantes de potasio son altamente solubles. Las deficiencias de micronutrientes se deben a menudo a su conversión a formas insolubles en suelos calcáreos o a la incapacidad de las plantas para movilizarlos y transportarlos; su deficiencia se resuelve por lo general con formas unidas a compuestos orgánicos (complejos o quelatos).

23.1. INTRODUCCIÓN

Los fertilizantes o abonos son productos inorgánicos u orgánicos que se utilizan para proporcionar nutrientes a las plantas. En general tienen que cumplir con normativas específicas. Por ejemplo, la Regulación Europea 2003/2003, establece las reglas que debe seguir toda la UE en sus directivas nacionales para regular las propiedades, la calidad y el tráfico de fertilizantes comerciales. De acuerdo con la normativa europea, los abonos pueden contener diferentes tipos de nutrientes:

a) Nutrientes primarios: Nitrógeno, fósforo y potasio, que son generalmente los nutrientes que tienen que ser suministrado en grandes cantidades (decenas o centenas de kilogramos por hectárea).

b) Nutrientes secundarios: Calcio, magnesio, sodio y azufre, también absorbidos por las plantas en grandes cantidades, pero que no siempre tienen que ser aplicados. El sodio no es un "nutriente esencial" desde un punto de vista fisiológico, pero es requerido por algunas especies como las C4, y se define como "nutriente beneficioso".

c) Micronutrientes: Boro, cobalto, cobre, hierro, manganeso, molibdeno y zinc, se requieren en pequeñas cantidades en comparación con los nutrientes primarios y secundarios; todos son "nutrientes esenciales" a excepción del cobalto (p.ej. beneficioso para las leguminosas). La regulación europea no incluye el níquel y el cloruro, que también son esenciales, pero rara vez se requieren como fertilizante.

El producto fertilizante y la técnica de aplicación deben ser elegidos para alcanzar la máxima eficiencia en el uso de los nutrientes aplicados, lo que implica que la mayor parte del nutriente aplicado debe ser absorbido por las plantas. Los fertilizantes pueden ser aplicados antes o después de la siembra. La aplicación antes de la siembra se denomina de "presiembra", aunque tradicionalmente se ha denominado de fondo o sementera, términos que siguen siendo habitualmente utilizados por los agricultores y comercialmente. La aplicación después de la siembra con el cultivo ya establecido se denomina de "cobertera". La aplicación de fertilizantes al suelo puede realizarse de forma manual, utilizando máquinas (abonadora), o a través del sistema de riego (fertirrigación). Los fertilizantes también se pueden aplicar a los órganos aéreos (pulverización foliar), en particular cuando las condiciones del suelo no son favorables para la absorción de nutrientes (p.ej. suelo muy seco) o para lograr una rápida respuesta en condiciones de deficiencia. El abono se puede aplicar sobre todo el campo o sólo en parte del mismo (localizado o en bandas, preferiblemente cerca de las plantas), siendo este último preferible para los nutrientes que se pueden fijar en el suelo, como el fósforo o el potasio, en particular en terrenos pobres en nutrientes o en suelos con una alta capacidad de fijación.

El aumento del uso mundial de fertilizantes es en parte responsable del aumento en la producción de alimentos (Fig. 23.1). La Tabla 23.1 muestra la variación en el uso de fertilizantes para los diferentes continentes. El uso de fertilizantes tiene una tendencia a la baja en Europa a excepción del N, mientras que muestra una clara tendencia creciente en Asia y América (sólo para N). Los valores son muy bajos y no muestran ninguna tendencia clara en África.

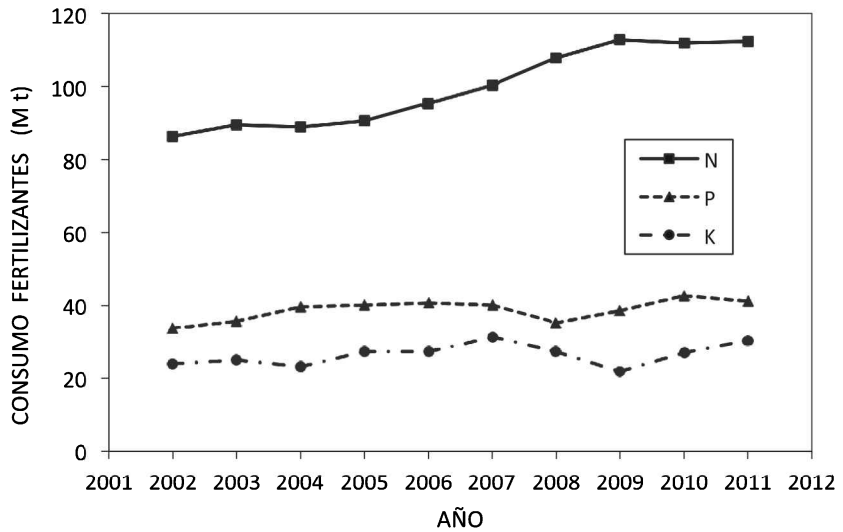


Figura 23.1. Consumo mundial de fertilizantes de N, P y K (2001- 2011).

Tabla 23.1. Consumo de fertilizantes por continentes (2003-2011). Fuente: FAO stats

Año	Europa			Asia			Africa			América y Pacífico		
	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O
	M ton											
2002	12.9	4.0	5.2	52.0	18.6	9.3	2.6	1.0	0.5	18.8	10.2	9.1
2003	13.5	4.2	4.7	52.6	18.9	9.6	3.0	1.0	0.5	20.3	11.7	10.3
2004	13.1	4.2	4.8	52.5	22.2	7.1	3.1	1.1	0.5	20.2	12.2	11.0
2005	12.7	4.1	4.4	54.8	23.5	12.9	3.1	1.0	0.5	19.9	11.4	9.6
2006	12.8	4.0	4.6	59.8	24.2	12.6	2.8	1.0	0.6	20.2	11.4	9.6
2007	13.7	4.3	4.9	61.9	22.0	15.5	2.8	1.1	0.6	22.0	12.7	10.5
2008	13.1	3.2	3.7	71.1	20.9	13.6	3.3	1.0	0.5	20.5	10.2	9.7
2009	12.7	3.1	3.4	77.6	25.6	11.3	2.8	1.1	0.4	19.9	8.8	7.0
2010	13.3	3.4	4.1	73.6	27.2	12.7	3.2	1.2	0.4	21.8	10.7	9.8
2011	13.6	3.5	4.1	71.4	23.2	14.9	3.3	2.2	0.4	24.1	12.2	10.9
Superficie agrícola 2011 (M ha)	470			1634			1170			1626		
Consumo medio (kg/ha) 2011	28.9	7.4	8.8	43.7	14.2	9.1	2.8	1.9	0.3	14.8	7.5	6.7

23.2. CLASIFICACIÓN

Los fertilizantes se pueden clasificar según diferentes criterios:

a) En función de su naturaleza: orgánicos e inorgánicos (también llamados minerales o químicos). Los fertilizantes inorgánicos son aquellos en los que los nutrientes están en forma mineral obtenidos por extracción (minería) o por procesos industriales. La cianamida cálcica, la urea y sus productos de condensación y asociación y los fertilizantes que contienen micronutrientes quelados o complejados pueden clasificarse como abonos inorgánicos por convenio. Los micronutrientes quelados y complejados se refieren a productos en los que el micronutriente se asocia a una molécula orgánica mediante una reacción de complejación; dependiendo del tipo de molécula orgánica definida en la normativa europea el producto se considera quelado (moléculas sintéticas orgánicas tales como EDDHA) o complejado (moléculas orgánicas naturales o presentes en los subproductos; no siempre un único compuesto, como los lignosulfonatos). En las explotaciones de agricultura orgánica sólo se admiten los fertilizantes provenientes de fuentes naturales (p.ej. residuos orgánicos agrícolas o nitrato de Chile).

b) De acuerdo con su composición:

   - Fertilizantes simples, que son los que contienen sólo un nutriente primario, y pueden ser nitrogenados, fosfatados o potásicos.
   - Fertilizantes compuestos, que son abonos con un contenido declarable de acuerdo con la ley de por lo menos dos nutrientes primarios obtenidos químicamente o por mezcla, o por una combinación de ambos procesos.
   - Fertilizantes complejos, que son los que se obtienen por reacción química, mediante solución o en estado sólido mediante granulación con un contenido declarable de al menos dos de los nutrientes primarios.

   Los fertilizantes compuestos y complejos pueden ser binarios, cuando tienen un contenido declarable de dos nutrientes primarios, o ternarios o completos, cuando tienen un contenido declarable de los tres nutrientes principales.

   Los fertilizantes con nutrientes secundarios o micronutrientes, son aquellos productos de uno de los tres tipos anteriores con cantidades declarables de estos nutrientes.

c) De acuerdo a su presentación física, que a menudo determina las condiciones de su uso y su eficacia, los fertilizantes pueden ser clasificados como:

   - Fertilizantes sólidos, con diferentes tipos de presentación en función de su fabricación, solubilidad, y método de aplicación:
   - Polvo o no granular, cuando el producto se presenta en forma de partículas finas con un diámetro por lo general de hasta 3 mm. Muy pocos materiales se venden ahora en esta forma ya que presentan problemas en la manipulación

(se apelmazan) y no se pueden aplicar con abonadoras. El polvo es una presentación usual en los productos poco solubles ya que el pequeño tamaño de partículas potencia su solubilización.

- Cristalinos, que son por lo general fertilizantes muy solubles para la preparación de soluciones de fertirrigación o pulverización foliar. No son adecuados para la aplicación con abonadoras.
- Granulados, que están diseñados para mejorar la uniformidad de distribución mecánica. Más del 90% de las partículas tiene que presentar diámetros entre 1 y 4 mm. La forma esférica es deseable. La distinción entre granular y peletizado se refiere al método de producción industrial.
- Peletizados, que son fertilizantes granulares con tamaño muy uniforme de gránulos esféricos que mejora la uniformidad de distribución.
- Macrogránulos, con gránulos de 1 a 3 cm para producir una liberación más lenta de los nutrientes.

Los fertilizantes líquidos pueden ser fertilizantes en suspensión o solución, o en ambas; los fertilizantes presentados sólo en suspensión como partículas dispersas son llamados "fertilizantes en suspensión", mientras que las soluciones libres de partículas sólidas son "fertilizantes en disolución". Las soluciones a presión son las que incluyen amoníaco anhidro en una concentración mayor que la que se puede mantener en equilibrio con la atmósfera.

Los fertilizantes gaseosos, con sólo un fertilizante en esta categoría (amoníaco anhidro), deben ser inyectados al suelo.

23.3. PROPIEDADES DE LOS FERTILIZANTES

23.3.1. Propiedades físicas

Las propiedades físicas de los fertilizantes no están reguladas por la ley. Sin embargo, estas propiedades son fundamentales para su correcta manipulación, almacenamiento, y conservación y para lograr una aplicación homogénea sobre los cultivos. En los abonos sólidos las propiedades más relevantes son:

a) Dureza, es decir, la resistencia a romperse, lo que es importante para evitar la rotura de los gránulos durante la manipulación y para evitar la formación de polvo debido a la abrasión.

b) La fluidez, que significa un bajo riesgo de apelmazamiento tras su almacenamiento.

c) El tamaño de partícula, que debe ser homogéneo para garantizar una correcta aplicación mediante abonadora.

d) La humedad, que debe ser baja para evitar el apelmazamiento.

e) La densidad, que es relevante para el almacenamiento y para la segregación durante la aplicación de abonos mezclados con diferente densidad; la distribución de una mezcla de varios fertilizantes podría resultar muy heterogénea si se mezclan compuestos con muy diferente densidad.

23.3.2. Propiedades químicas

Las propiedades químicas son importantes en la velocidad potencial de acción del fertilizante y en los efectos colaterales en los cultivos y las propiedades del suelo. Las principales propiedades químicas que deben ser consideradas en los abonos son las siguientes:

a) Solubilidad: determina la velocidad a la que los nutrientes pueden pasar a la solución del suelo y por lo tanto, encontrarse disponibles para las plantas. Por lo general se mide en agua para fertilizantes nitrogenados y potásicos. Para fosfato, por lo general menos soluble, además de agua, se han utilizado tradicionalmente citrato amónico o ácido cítrico para caracterizar su solubilidad tratando de simular el efecto de raíces de las plantas en el suelo (exudación de ácidos de bajo peso molecular). La solubilidad en agua es fundamental para los fertilizantes utilizados en fertirrigación para evitar la obstrucción de los goteros. La solubilidad aumenta al aumentar la temperatura y la acidez de las soluciones. Se debe tener cuidado con las mezclas que pueden promover la precipitación de compuestos, tales como los fertilizantes con Ca que pueden promover la precipitación de fosfatos de Ca.

b) Reacción del fertilizante en el suelo, que puede ser ácida o básica, dependiendo del efecto del fertilizante sobre el pH del suelo. Tradicionalmente se ha medido por el "índice de acidez", que es la cantidad equivalente de CaO que neutraliza el efecto de la fertilización con reacción ácida o que promueve el mismo incremento de pH en el suelo en los abonos con reacción básica. La reacción de los fertilizantes puede ser el resultado de: (i) su composición química, por ejemplo, el amoníaco anhidro es una base, o una base (p.ej. Ca), que es el contraión en los fertilizantes nítricos; (ii) de su reacción en el suelo; por ejemplo, la nitrificación de amonio en el suelo produce acidez, o la descomposición de la cianamida cálcica genera $Ca(OH)_2$ que aumenta el pH del suelo, o (iii) la presencia de impurezas tales como el ácido sulfúrico en el sulfato amónico.

c) Indice de sal, que mide el efecto del fertilizante sobre el potencial osmótico; es un valor relativo en comparación con el nitrato sódico, que recibe un valor arbitrario de 100.

d) Higroscopicidad: es la capacidad de un material de absorber humedad de la atmósfera y se mide como el valor de la humedad relativa a la que el fertilizante comienza a absorber agua. En muchos casos, la higroscopicidad es proporcional a la solubilidad del fertilizante. La absorción de agua provoca la disolución de las partículas, lo que deshace la estructura física de los fertilizantes y los convierte en terrones en lugar de los gránulos originales, lo que empeora la dis-

tribución mecánica. La delicuescencia es la propiedad de disolverse en el agua retenida por higroscopicidad. Esta situación extrema se produce con fertilizantes higroscópicos muy solubles en agua, tales como muchos de los fertilizantes nitrogenados.

23.3.3. Concentración de nutrientes en los fertilizantes

La concentración de nutrientes en el abono es la cantidad de nutrientes por unidad de peso del producto. Después de estimar necesidades de nutrientes del cultivo, esta información es básica para calcular la cantidad de fertilizantes a aplicar. La concentración de nutrientes en los fertilizantes debe ser expresada de la siguiente forma, de acuerdo con la legislación de muchos países (p.ej. España):

a) El nitrógeno, como nitrógeno elemental (N)

b) El fósforo, potasio, calcio, magnesio, sodio y azufre en forma de óxidos (K_2O,P_2O_5, CaO, MgO, Na_2O, y SO_3)

c) Otros nutrientes, como los micronutrientes, en forma elemental.

Sin embargo, la normativa europea permite a los países europeos elegir entre óxidos y expresión elemental de los nutrientes considerados en el caso b). La tendencia actual es la de expresar la concentración de todos los nutrientes en su forma elemental. La concentración de los nutrientes principales de un fertilizante compuesto o complejo se denomina riqueza y se indica generalmente por tres números separados por guiones que corresponden a los porcentajes de N, P_2O_5 y K_2O.

Ejemplo 23.1.

Un fertilizante ternario 15-15-15 tiene concentraciones de 15, 15 y 15% de N, P_2O_5 y K_2O, respectivamente. Si expresamos la concentración en forma elemental tenemos:

N 15%
P 15% x 62 kg P / 142 kg P_2O_5 = 6.5%
K 15% x 78 kg K / 94 kg K_2O = 12.45%

El factor de conversión se calcula como la relación entre masa del elemento en la molécula y masa de la molécula.

El contenido de nutrientes secundarios o micronutrientes en un fertilizante complejo o compuesto se expresa por otro número con el porcentaje del nutriente y la indicación de cuál es. Por ejemplo, si el ternario mencionado anteriormente tiene el 2% de MgO, esto se debe indicar como: 15-15-15-2 MgO.

Las concentraciones de nutrientes de diferentes fertilizantes se presentan en la Tabla 23.2.

Tabla 23.2. Principales fertilizantes minerales y su contenido de macronutrientes.

	N (%)	P_2O_5 (%)	P(%)	K_2O (%)	K (%)
Fertilizantes nitrogenados simples					
Nitrato de sodio	15.5				
Nitrato de calcio	16				
Nitrato de magnesio	10.5				
Sulfato amónico	21				
Urea	46				
Cianamida cálcica	16-20				
Amoniaco anhidro	82				
Soluciones de amoniaco a presión	41				
Sulfato amónico	21				
Nitrato amónico	32				
Nitrato amónico cálcico	20.5-30				
Nitrosulfato amónico	26				
Soluciones de nitrógeno	20-32				
Fertilizantes de liberación lenta					
Urea formaldehído (UF)	38				
Isobutilidendiurea (IBDU)	32				
Crotonilidendiurea (CDU)	31				
Fertilizantes de fósforo simples					
Superfosfato		18-21	8-9		
Superfosfato triple (TSP)		45	20		
Ácido fosfórico		54	24		
Ácido superfosfórico		76	33		
Fosfato dicálcico		40	17		
Metafosfato de calcio		64	28		
Fosfato calcinado		18-28	8-12		
Escorias básicas		15	7		
Roca de fosfato		25-40	11-17		

Fertilizantes potásicos simples					
Cloruro potásico				60	50
Sulfato potásico				50	41.5
Fertilizantes complejos					
Binarios NP					
Fosfato monoamónico (MAP)	10-12	48-60	21-26		
Fosfato diamónico (DAP)	18	46	20		
Polifosfato de amonio (APP)	10-11	34-37	15-16		
Nitrofosfato	20	20	9		
Binario PK					
Fosfato potásico		52	23	34	28
Binario NK					
Nitrato de potasio	13			44	36.5

23.4. LOS FERTILIZANTES NITROGENADOS SIMPLES

23.4.1. Los fertilizantes con nitrato

Los fertilizantes con nitrato son muy solubles en agua y el ión nitrato, una forma de N fácilmente absorbida por las plantas, no se fija a las partículas del suelo cuando se aplica por lo que permanece en la disolución del suelo. Por lo tanto, el N aplicado en esta forma se absorbe rápidamente, pero se puede lixiviar y perder desde el suelo. Se puede considerar un fertilizante de acción rápida, y por tanto se debe aplicar cuando pueda ser utilizado por el cultivo para evitar pérdidas (típicamente como cobertera). Estos fertilizantes muestran una alta higroscopicidad y una reacción ligeramente básica. Además de esta reacción, el nitrato puede provocar el aumento del pH del apoplasto en la planta o en la rizosfera ya que su absorción en las células está acoplado con protones, lo que disminuye la acidez de estos medios.

Los principales fertilizantes de este grupo son el nitrato de calcio (16% N) y nitrato sódico (nitrato de Chile) (15.5% N). Este grupo también incluye el nitrato de magnesio (10.5% N), muy soluble y utilizado en fertirrigación, a veces como fertilizante en solución.

23.4.2. Los fertilizantes amónicos o amoniacales

El amonio suministrado con estos fertilizantes es un catión que es fácilmente adsorbido por el complejo de cambio del suelo y por lo tanto no se lixivia cuando ocurre

percolación. Por lo tanto, este tipo de fertilizantes se recomienda para aplicaciones en presiembra en cultivos de invierno, cuando el alto riesgo de lixiviación y la baja extracción de los cultivos coinciden al comienzo del ciclo. Aunque el amonio puede ser absorbido por las plantas, la nitrificación (transformación microbiana de amonio a nitrato) mejora su uso por las plantas. A altas concentraciones el amonio puede ser tóxico para los cultivos. Con pH básico en el suelo aumenta el riesgo de pérdidas a la atmósfera por volatilización. Este riesgo se incrementa si el fertilizante no se incorpora en el suelo, por lo que es menos adecuado para aplicaciones de cobertera. En cultivos hidropónicos, una porción del N debe ser aplicada en forma de amonio (10-20%) para evitar el aumento del pH en la solución debido a la absorción de nitrato, que provocaría una disminución de la disponibilidad de otros nutrientes como el Fe.

Este grupo incluye sulfato amónico (21% N, 24% S), amoniaco anhidro (gas, 82% N) y soluciones de amoniaco a presión (41%), que se tienen que inyectar en el suelo a 15-20 cm de profundidad, con condiciones de humedad suficiente. El amoniaco anhidro es el fertilizante nitrogenado más barato, pero requiere una maquinaria especial para su aplicación y es difícil de almacenar y manipular. Otro problema en los EE.UU. ha sido el robo de amoníaco anhidro de los tanques de almacenamiento en las explotaciones para la producción de metanfetamina, una droga ilegal.

23.4.3. Los fertilizantes con nitrato y amonio

Estos fertilizantes combinan las ventajas de ambas formas de N: rápida disponibilidad del nitrato y disponibilidad más prolongada del amonio. No dependen enteramente de la nitrificación para proporcionar nitrato por lo que se pueden utilizar en períodos de baja temperatura cuando la tasa de nitrificación es baja. Se utilizan sobre todo en invierno y en la primavera en cobertera.

Este grupo incluye el nitrato amónico (32% N) y el nitrosulfato amónico (26% N). Una de las principales preocupaciones en el uso de nitrato amónico es su empleo para la producción de explosivos como el ANFO que se utiliza en la minería y se puede fabricar de forma casera mezclando nitrato amónico (AN) con combustible en las proporciones adecuadas. Ha sido por tanto empleado a menudo por los terroristas lo que ha llevado a una fuerte regulación en muchos países en relación con el control de su adquisición y con su formulación comercial. Por ejemplo, en Irlanda e Irlanda del Norte el nitrato amónico se comercializa como una mezcla de nitrato amónico y carbonato cálcico.

23.4.4. Urea y productos relacionados

La urea (46% N) y la cianamida cálcica (alrededor del 20% de N en productos comerciales) se incluyen en este grupo. La urea contiene N en forma ureica y la cianamida se transforma en urea en el suelo. Tiene reacción ácida, y es muy soluble e higroscópica. La urea es un sólido cristalino blanco que se puede comprar en forma de pellets o como un material granulado. La importancia de los gránulos está

aumentando ya que son más grandes, más duros y más resistentes a la humedad. La urea se hidroliza rápidamente a amonio gracias a la enzima ureasa, presente en los suelos. Esto requiere una cierta temperatura y humedad. La urea es altamente soluble por lo que puede ser lixiviada antes de la hidrólisis. Su aplicación a la superficie del suelo puede implicar pérdidas por volatilización de amoniaco formado durante la hidrólisis por lo que es aconsejable incorporarla mediante una labor o un riego. La urea es ampliamente utilizada tanto para aplicaciones de presiembra como de cobertera debido a su bajo coste por unidad de N aplicado. También se puede aplicar en forma de soluciones que pueden contener también nitrato amónico. Su alta solubilidad hace factible su uso en fertirrigación y en pulverizaciones foliares, que se recomiendan en plantaciones de frutales cuando las condiciones del suelo no son apropiados para la absorción de N por las raíces (p.ej. suelo seco). El contenido de biuret (producto de condensación) en los fertilizantes de urea debe ser controlado ya que es fitotóxico, en particular para aplicaciones foliares. En urea de aplicación foliar, el contenido máximo recomendado de biuret es del 0.25%. Para reducir la lixiviación, se han desarrollado fertilizantes de liberación lenta basados en la urea. Estos se basan en cualquier forma de reducción de la solubilidad (gránulos más grandes, recubrimientos especiales como parafina o azufre) o mediante la adición de inhibidores de la nitrificación.

La cianamida cálcica al ser incorporada al suelo da lugar a urea e hidróxido cálcico, lo que explica su fuerte reacción básica. Es cara, puede ser fitotóxica, y libera lentamente el N disponible, por lo que sólo se recomienda como fertilizante de presiembra.

23.5. FERTILIZANTES DE P SIMPLES

Los fertilizantes fosfatados son producidos por tratamientos físicos (molienda, calcinación) o químicos (ataque ácido) de roca de fosfato, que es un recurso natural no renovable. La característica más importante de los fertilizantes fosfatados simples es la baja solubilidad en agua de muchos de ellos. Esta baja solubilidad en agua no implica necesariamente que las plantas no puedan utilizarlos como fuente de P. Los ácidos orgánicos exudados por las raíces, tales como citratos, contribuyen a la movilización del P mediante la solubilización de muchos de los precipitados de este nutriente en el suelo. Esta es la razón por la que solubilidad de fertilizantes de P se mide también con citrato amónico. La suma de las fracciones de P solubles en agua y en citrato del fertilizante es considerada como disponible para las plantas por lo que se indica en la etiqueta de los fertilizantes. Por lo general, el componente soluble en citrato es menor que el componente soluble en agua. De acuerdo con la solubilidad, se pueden distinguir tres grupos principales de fertilizantes de P:

a) Solubles en agua, incluyendo superfosfato simple (18-21% P_2O_5, 8-9% P, 85% soluble en agua), superfosfato triple (45% P_2O_5, 20% P, 85% soluble en agua), ácido fosfórico (54% P_2O_5, 24% P) y ácido superfosfórico (76% P_2O_5, 33% P). Los dos ácidos se utilizan sólo en fertirrigación (véase el Capítulo 26).

b) Parcialmente solubles en citrato amónico, tales como el fosfato dicálcico (40% P_2O_5, 17% P) y metafosfato de calcio (64% P_2O_5, 28% P).

c) Insolubles, incluyendo fosfatos calcinados (18-28% de P_2O_5, 8-12% P), escorias básicas (o escorias Thomas, subproducto de la industria del acero) (15% de P_2O_5, 7% P) y roca de fosfato molida (25-40% de P_2O_5, 11-17% de P, procedente de la minería, sin tratamiento químico en la industria).

Los fertilizantes de P más solubles deben ser incorporados en forma granular y localizada cuando sea posible para mejorar su eficiencia, especialmente en suelos pobres en P o en suelos con una alta capacidad de fijación de P. Las formas menos solubles están disponibles en forma de polvo o gránulos finos que deben ser mezclados con el suelo para mejorar su disolución.

23.6. FERTILIZANTES DE K SIMPLES

Los abonos potásicos también proceden de recursos mineros, que no son tan limitados como la roca de fosfato. Aunque los fertilizantes potásicos son muy solubles en agua, los iones de potasio son generalmente adsorbidos en el complejo de cambio del suelo, lo que reduce el riesgo de pérdidas. Al igual que con los fertilizantes fosfatados, la localización en bandas de los fertilizantes potásicos es recomendable en suelos deficientes en K con alta capacidad de intercambio catiónico para saturarlos en la zona tratada y mantener una alta disponibilidad de K en la disolución del suelo.

Los dos fertilizantes que sólo contienen K como nutriente principal son el cloruro potásico (60% K_2O, 50% K) y el sulfato potásico (50% K_2O, 41.5% K). El primero es más barato y más soluble, pero no se debe emplear en condiciones salinas para evitar los efectos negativos del cloruro.

23.7. FERTILIZANTES COMPUESTOS Y COMPLEJOS

Este grupo incluye los abonos binarios y ternarios. Los binarios son por lo general abonos complejos, y los ternarios son abonos compuestos, obtenidos principalmente por mezcla de abonos simples y complejos. Los fertilizantes complejos y compuestos facilitan la aplicación simultánea de varios nutrientes, evitando que las mezclas sean hechas por los agricultores, lo que podría empeorar la distribución del abono y generar problemas de compatibilidad entre los productos mezclados. La selección del fertilizante compuesto o complejo debe basarse en la proporción relativa de N, P, y K que necesita el cultivo, y en el precio por unidad de nutriente aplicado. La mezcla de fertilizantes para producir fertilizantes compuestos debe tener en cuenta las reglas básicas de incompatibilidad: evitar las mezclas de fertilizantes de P con productos con Ca para evitar la precipitación de P, y evitar las mezclas de fertilizantes amónicos con productos de reacción básica para evitar la volatilización de amoniaco.

a) Los abonos binarios NP incluyen fosfatos de amonio, fosfato monoamónico (MAP) y fosfato diamónico (DAP), polifosfatos de amonio y nitrofosfatos. El DAP (18-46-0) es el fertilizante con P más ampliamente usado en el mundo. Es altamente soluble y promueve una reacción básica del suelo alrededor del gránulo. El MAP (10/12-48/60-0) es menos soluble que el DAP pero su reacción es ácida, lo que lo hace preferible en fertirrigación. Los polifosfatos de amonio (APP, 10/11-34/37-0) tienen parte del P como polifosfatos que deben ser hidrolizados por la acción de enzimas en el suelo para pasar a la forma de ortofosfato disponible lo que requiere varias semanas con la temperatura y el contenido de agua adecuados. Los APP se utilizan con frecuencia en los abonos líquidos, entre otras razones por su reacción ácida. Los nitrofosfatos (20-20-0) tienen sólo una parte de P soluble en agua y el N en forma nítrica y amónica. Los fosfatos de amonio son fertilizantes típicos utilizados en aplicaciones de presiembra, en particular si el K no es necesario. La combinación de amonio y fosfato parece mejorar la absorción de P por las plantas en comparación con otras fuentes de P.

b) Los abonos binarios PK son mezclas de fosfatos y cloruro potásico o sulfato potásico, o fosfatos y polifosfatos de potasio. El fosfato de potasio (0-52-34) es soluble y tiene una ligera reacción ácida. Puede ser utilizado en fertirrigación y en aplicaciones foliares. Es más caro que otros fertilizantes binarios con P.

c) Los abonos binarios NK incluyen mezclas de fertilizantes simples de N y de K, y sólo un abono complejo, el nitrato potásico (13-0-44). Se trata de un producto muy soluble recomendado para fertirrigación y aplicaciones foliares. Se puede aplicar en cobertera si se requiere K adicional al aportado en fondo.

d) Los fertilizantes ternarios NPK son mezclas sólidas o líquidas de fertilizantes simples y compuestos con una amplia gama de calidades y presentaciones. Se utilizan para aplicaciones de presiembra. Aunque la cantidad de N aplicado como productos ternarios es realmente modesta, representan a menudo la mayor parte del P y K aplicado al suelo. Dependiendo de cada producto en particular, los nutrientes pueden estar presentes en diferentes formas químicas.

23.8. LOS FERTILIZANTES Y PRODUCTOS CON NUTRIENTES SECUNDARIOS

A pesar de que los cultivos pueden absorber grandes cantidades de nutrientes secundarios, su aplicación no es frecuente debido a que las reservas disponibles en el suelo pueden cubrir las extracciones del cultivo. Su aplicación suele seguir una estrategia de "suficiencia", lo que significa que los nutrientes se aplican sólo si se puede esperar un aumento del rendimiento en respuesta a su aplicación.

El calcio puede ser extraído en grandes cantidades por los cultivos, y su concentración en las hojas puede llegar a ser mayor que la de N (p.ej. en los cítricos). La necesidad de aplicar Ca como fertilizante es rara; su deficiencia es típica en suelos ácidos con baja saturación de bases del complejo de cambio. En algunas ocasiones

los problemas de antagonismo con Mg hacen aconsejable su aplicación. Los fertilizantes con cantidades significativas de Ca son:

a) Fertilizantes nitrogenados: nitrato amónico cálcico (10-20% CaO, 7-14% Ca), cianamida cálcica (54% CaO, 39% Ca) y nitrato de calcio (28% CaO, 20% Ca).

b) Fertilizantes con P: superfosfato (17-28% CaO, 12-20% Ca, en su mayoría presentes en forma de yeso), escorias (45-50% CaO, 32-36% Ca), y fosfato dicálcico (32% CaO, 23% Ca).

El calcio se suele añadir en las enmiendas utilizadas para la recuperación de suelos sódicos o ácidos, lo que implica un aporte del nutriente que puede aliviar su deficiencia en los cultivos. Como enmiendas para corregir la acidez del suelo, se emplean productos que contienen Ca y/o carbonato de Mg u óxido o hidróxido de Ca. Los productos más comunes son la roca caliza, básicamente constituida de carbonato cálcico (45-55% CaO, 32-39% Ca), la cal u óxido de Ca (100% CaO, 71% Ca), y la dolomita, rocas básicamente constituidas por carbonatos cálcico y magnésico (30% CaO, 21% Ca). Estos productos son eficaces en el aumento de la saturación de bases (principalmente Ca) y el pH del suelo.

Para la corrección de los suelos sódicos el yeso (33% CaO, 24% Ca) y el fosfo-yeso (un subproducto de la industria de los fertilizantes de P constituído esencialmente por yeso) son la mejor opción en cuanto a eficiencia y precio.

El magnesio es necesario en cantidades inferiores al Ca. Su deficiencia se debe a menudo al antagonismo con Ca, y en ocasiones con K cuando los fertilizantes potásicos se aplican en grandes cantidades, especialmente en suelos ricos en K. Su concentración es baja en la mayoría de los fertilizantes. Cuando sea necesario se puede añadir como dolomita (20% MgO, 12% Mg), óxido de magnesio (90% MgO, 54% Mg), quelatos de magnesio (aplicación foliar) y sulfato de magnesio (16% MgO, 10% Mg). Este último puede ser aplicado mediante pulverizaciones foliares.

La extracción de azufre por los cultivos puede ser tan alta como la de P, siendo particularmente importante en las leguminosas (p.ej. más de 45 kg/ha en la alfalfa) y en las crucíferas. Está presente en muchos fertilizantes, tales como sulfato amónico (24% S), nitrosulfato amónico (12% S), y superfosfatos (12% S en superfosfato simple), que ha sido una fuente tradicional de S para los cultivos. Sin embargo, la tendencia a la disminución en el uso de sulfato amónico, superfosfatos, y S elemental como fungicida podría conducir a deficiencias de S en el futuro próximo. La necesidad de la adición de S no es común, pero si es necesario se puede aplicar como ácido sulfúrico (30% S), azufre elemental (30-99% S), sulfato potásico (17% S) y urea-azufre (19% S).

23.9. LOS FERTILIZANTES Y PRODUCTOS CON MICRONUTRIENTES

Los micronutrientes se aplican por lo general según una estrategia de suficiencia, lo que significa que su aplicación se realiza sólo si se prevé una deficiencia. Con fre-

cuencia, la deficiencia de micronutrientes es la consecuencia de las condiciones del suelo que promueven un fallo en los mecanismos de movilización, en la absorción o en el transporte en las plantas, y no el resultado de una falta de nutrientes en el suelo. El caso paradigmático es la clorosis por deficiencia de hierro, relacionada con las condiciones alcalinas y calcáreas, y no a la falta de hierro en el suelo. Los fertilizantes más comunes en el mercado no contienen cantidades significativas de micronutrientes, con la excepción del nitrato de Chile y las escorias. Los micronutrientes no se añaden a otros fertilizantes, debido al riesgo de toxicidad. Las deficiencias, cuando se detectan, se tratan con productos específicos.

La deficiencia de hierro se llama "clorosis férrica" y se asocia normalmente a suelos calcáreos y plantas sensibles. La aplicación de sales inorgánicas de Fe (sulfatos y carbonatos) al suelo por lo general no es eficaz debido a la rápida oxidación de Fe en el suelo que da lugar a la precipitación de óxidos insolubles de Fe (III). Estos productos son más eficaces por pulverización foliar o inyecciones al tronco. La única sal inorgánica eficaz para superar el problema (durante varios años) es la vivianita (fosfato ferroso). La siderita (carbonato de Fe) con tamaño coloidal también puede ser eficaz. La forma más efectiva y fácil de usar es la de los quelatos de Fe, aunque son caros y tienen bajo efecto residual (pueden requerir 3-4 aplicaciones por campaña). Los quelatos de hierro son Fe complejado por compuestos orgánicos (generalmente ácidos amino-carboxílicos sintéticos) que proporcionan un suministro de Fe que se mantiene disponible en el suelo, y también un efecto positivo en el mecanismo de transporte de Fe a través de las membranas celulares. El quelato a emplear debe ser elegido teniendo en cuenta las condiciones del suelo; por ejemplo, los quelatos aplicados en suelos calcáreos deben ser estables en condiciones de alta concentración de Ca y alto pH en la solución del suelo. En suelos calcáreos, el quelato de Fe más utilizado es el EDDHA-Fe. Los quelatos de Fe pueden ser aplicados directamente al suelo o por fertirrigación; se debe tener cuidado con las aplicaciones foliares ya que los quelatos no siempre son foto-estables. Otro tipo de complejos de Fe se pueden obtener usando la materia orgánica natural como sustancia complejante (p.ej. lignosulfonatos); en este caso, la definición del producto es complejos de Fe.

La deficiencia de zinc es, junto a la de Fe, la que más contribuye a reducir los rendimientos agrícolas en suelos calcáreos. La estabilidad de los quelatos de Zn es alta, pero en un intervalo de pH muy estrecho (típicamente 6.5 a 7.5 para muchos productos comerciales). Además, el Zn está fuertemente ligado a los agentes complejantes cuando hay poco Zn libre en el suelo, lo que limita su uso por las plantas. Esta es la razón por la cual se realizan aplicaciones conjuntas de quelatos y sales inorgánicas (sulfatos, nitratos, cloruros, óxidos). La aplicación sólo de fuentes inorgánicas podría ser más eficaz que en el caso del Fe. Los lignosulfonatos de Zn también están disponibles comercialmente como fuente de Zn para los cultivos.

El manganeso y el cobre se pueden aplicar si es necesario como productos inorgánicos (cloruros, sulfatos, nitratos, u óxidos, que sin embargo son menos solubles) o quelatos. No existen compuestos quelantes específicos para Cu o Mn, por lo que su aplicación en forma de quelatos no siempre tiene éxito.

La deficiencia de molibdeno es usual en los suelos muy ácidos, en los que su solubilidad disminuye significativamente. Si es necesario se aplica como sales inorgánicas tales como molibdato amónico o sódico. Las enmiendas para aumentar el pH del suelo en suelos ácidos puede contribuir a una mayor disponibilidad de este nutriente.

La deficiencia de boro se produce a menudo en los cultivos más exigentes (alfalfa, remolacha, coliflor, girasol, olivo, etc.). Los suelos arenosos pobres en materia orgánica y los suelos con pH muy alto favorecen la deficiencia de B. Los principales productos son Bórax (11% B) y borato de sodio en aplicación foliar o en el suelo. También se puede usar B ligado a etanolamina o trietanolamina.

23.10. FERTILIZANTES DE LIBERACIÓN LENTA

Los fertilizantes de liberación lenta se centraron originalmente en el N ya que la solubilización progresiva del N reduce el riesgo de lixiviación, en particular en suelos arenosos. Recientemente se han desarrollado productos de liberación lenta que suministran diferentes combinaciones de nutrientes, entre ellos también los que se consideran no móviles en el suelo, como P y K. En la actualidad se está desarrollando una nueva línea de productos, en especial los fertilizantes fosfatados basados en compuestos organometálicos, cuya solubilización es mejorada por las condiciones de la rizosfera (p.ej. alta concentración de ácidos orgánicos) pensando en un uso progresivo y altamente eficiente de los nutrientes.

Los fertilizantes de liberación lenta de N se pueden clasificar en diferentes categorías:

a) Fuentes orgánicas naturales, productos que contienen parte de la N en forma orgánica, que debe ser mineralizada para ser utilizado por las plantas. Esta categoría se estudiará en la sección 23.11.

b) Productos formulados a partir de urea que se han hecho reaccionar químicamente, lo que frena la liberación de la urea en la solución del suelo, ya que estos compuestos deben ser hidrolizados; la velocidad de liberación depende de las condiciones ambientales como la temperatura y el contenido de agua del suelo, y también de la actividad microbiana en el suelo ya que ésta rompe el enlace entre la urea y las otras moléculas orgánicas que la estabilizan. Los principales grupos de esta categoría son: productos de reacción de urea-formaldehído (UF, productos comerciales que pueden tener 38% N y máxima velocidad de descomposición a pH 6.1- 6.5), isobutilidendiurea (IBDU, por lo general con 31% N, y velocidad máxima de descomposición a pH 4), crotonilidendiurea (CDU, por lo general 31% N, velocidad máxima de descomposición a pH básico), y triazonas (compuestos cíclicos con amonio).

c) Productos con liberación lenta de N lograda mediante revestimiento físico de los gránulos de urea. Las cubiertas se componen generalmente de azufre, cera o resinas, que forman una membrana semipermeable que permite una disolu-

ción lenta del fertilizante. La liberación se ha mejorado con la descomposición progresiva de las membranas. Algunos productos comerciales tienen diferentes contenidos de elementos primarios y secundarios y micronutrientes cubiertos de polímeros plásticos con poros que permiten una liberación lenta. En algunos casos, este tipo de productos es comercializado con una amplia gama de tiempos de liberación.

d) Algunos autores también consideran fertilizantes nitrogenados de liberación lenta aquellos basados en urea o amoniaco mezclado con inhibidores de la nitrificación como la nitrapirina. Esto permite que el amonio quede retenido en el complejo de cambio durante varias semanas, disminuyendo los riesgos de lixiviación y desnitrificación.

23.11. LOS FERTILIZANTES ORGÁNICOS

Los fertilizantes orgánicos son productos constituidos por materiales de origen animal o vegetal u obtenidos mediante su transformación (p.ej. compostaje) que contienen una concentración de nutrientes para las plantas suficientemente alta como para ser útiles como fertilizantes. Los nutrientes en el abono orgánico, tales como N, P y S, pueden estar al menos en parte en forma orgánica, y para ser absorbidos por las plantas deben ser previamente mineralizados por la acción de los microorganismos. Otros nutrientes, como K, están en forma catiónica y se pueden considerar fácilmente disponibles en estos productos.

Si estos productos contienen cantidades significativas de materia orgánica, se pueden utilizar como fuente de materia orgánica para los suelos, contribuyendo así a mejorar la estructura, o a aumentar la actividad biológica en los suelos. Entonces se les puede considerar como enmiendas orgánicas.

Los fertilizantes orgánicos más comúnmente utilizados se pueden clasificar en los siguientes tres grupos:

- Los desechos animales: purines, excrementos, estiércol, camas.
- Dentro de la granja: los residuos de cultivos, residuos de poda, abonado verde y las basuras.
- Externos: turba, compost de diferente origen (p.ej. residuos orgánicos urbanos), subproductos o residuos de la industria alimentaria (sangre, huesos, etc.).

Cabe señalar aquí que solo los residuos de las plantas generan humus. Así, este tipo de residuos contribuye a aumentar el contenido de materia orgánica del suelo y se recomienda como enmienda orgánica. Por otro lado, los residuos animales sólo contribuyen con nutrientes que pueden ser utilizados por el cultivo o por microorganismos. Los estiércoles están compuestos por excrementos de animales mezclados con paja de las "camas" del ganado, que contribuye a generar humus del suelo. El rendimiento en humus aumenta si la relación C:N en el residuo es alta, como en estiércoles frescos (mezclados con camas de ganado) o residuos de plantas ricos en

lignina como paja de cereales o serrín. Por otro lado, los residuos vegetales frescos con baja relación C:N no proporcionan mucho humus, pero son eficaces en el aumento de la actividad microbiana en el suelo, que es importante en muchos procesos relevantes que afectan el buen funcionamiento del suelo, tales como los implicados en el ciclo del N.

La aplicación directa de los residuos animales o su deposición directa sobre el terreno por los animales tiene varios inconvenientes:

- Alto contenido de agua y baja concentración de nutrientes, lo que aumenta el coste de aplicación por unidad de nutriente aplicado en comparación con los fertilizantes minerales (con alta concentración de nutrientes).
- Distribución poco uniforme.
- Las altas pérdidas de N por volatilización de amoniaco, especialmente si no se incorporan.
- Los malos olores y posibles contaminación química y microbiana de los cursos de agua si el producto se erosiona, por ejemplo, después de una lluvia intensa tras su aplicación.
- La adición de semillas de malas hierbas, microorganismos patógenos y larvas de insectos (p.ej. moscas).
- La fermentación en el campo de los residuos orgánicos frescos puede reducir la germinación de semillas y el crecimiento de las plántulas, debido a la producción de compuestos fitotóxicos o a la disminución de la presión parcial de oxígeno en el suelo alrededor de las plántulas.
- Algunos residuos con alta relación C:N, tales como el estiércol fresco o la paja de cereales, pueden promover una inmovilización inicial del N, que puede disminuir la disponibilidad de N para las plantas. Más tarde, después de humificación de los residuos, el N restante en ellos aumenta el contenido total de N en el suelo.

Muchos de estos problemas se reducen en gran medida si los residuos son sometidos a compostaje (descomposición aeróbica en el rango de temperatura de 40-65ºC). El compostaje implica una disminución de la relación C:N del residuo (típicamente, en el caso de estiércol de C:N> 50 a C:N<20) y un aumento en la densidad. Para evitar problemas, también es aconsejable aplicar con suficiente antelación antes de la siembra (2-3 meses al menos en el caso del estiércol fresco o residuos de cultivos). También es aconsejable incorporar los residuos o el compost en el suelo y evitar su aplicación junto con los productos de reacción básica tales como la cal ya que ello podría promover la volatilización de amoniaco.

Las principales limitaciones en el uso de fertilizantes orgánicos son las siguientes:

- La concentración de nutrientes en los fertilizantes orgánicos es muy variable dependiendo de la naturaleza y el procesamiento del producto. En el caso de los estiércoles la composición se ve afectada por las especies animales (Tabla 23.3), la

edad, la proporción de camas, la dieta y el tiempo de compostaje. Por lo general, los rangos de concentraciones de N, P y K en el estiércol son 0.3-0.8, 0.07-0.13 y 0.33-0.58 kg/t, respectivamente.

Tabla 23.3. Estiércol producido por año y animal para distintas especies y concentración promedio de macronutrientes de la materia fresca (compilado a partir de varias fuentes).

		Estiércol (fresco)	N	P	K	Total N	Total P	Total K
		kg/animal/año	%			kg/animal/año		
Vacuno leche	Vaca	17883	0.48	0.11	0.40	85.8	19.5	71.2
	Novilla	10367	0.53	0.17	0.51	54.9	17.7	53.3
Vacuno carne	Vaca	9925	0.6	0.16	0.33	59.6	16.0	32.9
	Engorde	8275	0.55	0.19	0.45	45.5	15.5	37.1
	Novillo	2867	0.51	0.14	0.41	14.6	3.9	11.9
Cerdo	Acabado	2350	0.76	0.31	0.46	17.9	7.4	10.7
	Engorde	3317	0.55	0.18	0.35	18.2	5.9	11.6
	Cría	495	0.55	0.20	0.32	2.7	1.0	1.6
	Cerda gestante	2110	0.78	0.37	0.43	16.5	7.7	9.1
	Cerda parida	4963	0.45	0.20	0.32	22.3	9.8	15.6
Aves de corral	Gallina	46.2	1.32	0.47	0.53	0.6	0.2	0.2
	Pollo	24.4	1.98	0.66	0.87	0.5	0.2	0.2
	Pavo	112	1.89	0.78	0.91	2.1	0.9	1.0
	Pato	50	1.01	0.45	0.56	0.5	0.2	0.3
	Ganso	100	1.1	0.26	0.41	1.1	0.3	0.4
Otros	Caballo	8600	0.57	0.11	0.45	49.0	9.4	38.5
	Oveja	610	0.94	0.17	0.65	5.7	1.0	3.9
	Cabra	1100	0.99	0.24	0.89	10.9	2.6	9.8
	Conejo	56	1.56	0.53	0.71	0.9	0.3	0.4

En las camas de aves, las concentraciones de nutrientes son generalmente más grandes, con el N y P por encima del 2%. Por lo tanto, es difícil saber la cantidad de nutriente que se aplica con una determinada tasa de fertilizante orgánico si no se realiza un análisis específico de cada lote aplicado.

- Los fertilizantes orgánicos tienen baja concentración de nutrientes por lo es difícil satisfacer la demanda del cultivo. Esto obliga a aplicar grandes cantidades de fertilizantes orgánicos o a un suministro adicional de fertilizantes minerales. Por ejemplo, la aplicación de 20 t/ha de estiércol de vaca puede proporcionar 60 kg de N/ha, 30 kg de P/ha y 80 kg de K/ha.
- Una parte de los nutrientes en estos productos se encuentran en forma orgánica, en particular N y P. Por lo tanto su liberación no es inmediata, ya que requiere la mineralización de la materia orgánica que puede tardar varios años en completarse. Se supone que el N en el estiércol se libera en 3-5 años; en los purines, una mayor porción de N está fácilmente disponible en la primera temporada después de la aplicación (60-70%). Esta liberación lenta de nutrientes presenta la ventaja de que los elementos móviles como nitrógeno son retenidos por el suelo, y se reducen las pérdidas por lixiviación. Además de esto, la aplicación de P en formas orgánicas o con matriz orgánica es más eficiente que los fertilizantes minerales para aumentar la reserva disponible en el suelo. Por otro lado, la liberación lenta de nutrientes a través de la mineralización implica que toda la cantidad de nutriente aplicado no está fácilmente disponible para las plantas, por lo que deben ser complementadas con fertilizantes minerales.
- El equilibrio de nutrientes en los fertilizantes orgánicos no coincide con el equilibrio requerido por los cultivos. Por ejemplo, los cereales suelen tener un N:P:K requerido de 7:1:4.8, por lo que cumplir con las necesidades de N con el estiércol de vaca descrito anteriormente implicaría un exceso de aplicación de P. Por lo tanto, para un suministro adecuado de nutrientes para el cultivo se requiere la combinación de fertilizantes orgánicos y minerales.

Los residuos animales y residuos vegetales o abono verde con leguminosas producidos en las explotaciones deben integrarse en un balance de nutrientes a escala de finca para un manejo de la fertilización sostenible, que debe tener en cuenta que los fertilizantes minerales u orgánicos externos deben completar la disponibilidad de nutrientes en los suelos más el potencial de suministro interno con residuos o abono verde. En los sistemas de agricultura orgánica o ecológica sólo se permiten fertilizantes orgánicos o naturales. Esto a menudo conduce a una disminución del rendimiento que en parte puede explicarse por el suministro limitado de nutrientes, aunque esto puede ser compensado por los mayores precios de los cultivos orgánicos.

BIBLIOGRAFÍA

European Commission (2003) Regulation 2003/2003 relating to fertilizers.

Guertal EA (2009) Slow nitrogen release fertilizers: a review. Hortechnology 19: 16–18.

International Plant Nutrition Institute. Nutrient source specific.http://www.ipni.net/specifics-en. Accessed 20th Nov 2013

Lampkin N (1990) Organic farming. Farming Press. Ipswich. UK.

Mengel DB, Rehm GW (2012) Fundamentals of fertilizer application. In: Huang PM, Li Y, Sumner ME (eds) Handbood of soil sciences, resource management and environmental impacts (2nd ed) CRC Press, Boca Ratón, pp 14-1-14-15

Lucena JJ (2006) Synthetic iron chelates to correct iron deficiency in plants. In: Barton LL,Abadía J(eds) Iron nutrition in plants and rhizospheric microorganisms. Academic Publishers, Springer, Dordrecht, The Netherlands, pp 103-128

Capítulo 24

La fertilización nitrogenada I: El balance de nitrógeno

M. QUEMADA
A. DELGADO
L. MATEOS
F.J. VILLALOBOS

RESUMEN:

El nitrógeno (N) es el nutriente más importante en la producción agrícola. La entrada natural de N se debe a la fijación de N, sobre todo por bacterias del género *Rhizobium* que infectan las raíces de las leguminosas. El N orgánico se convierte en inorgánico a través de la mineralización, y luego el N inorgánico es absorbido por las plantas. A menudo los microorganismos del suelo "roban" N inorgánico temporalmente cuando el residuo que descomponen tiene una relación C:N alta (proceso de inmovilización). El amonio en el suelo se convierte en NO_3^- a través de la nitrificación que se reduce en gran medida en suelos encharcados. En estos últimos la desnitrificación genera compuestos gaseosos de N que se pierden (óxidos de N y N_2). Las principales pérdidas de N pueden ocurrir por la lixiviación de nitrato que es proporcional a la percolación profunda y a la concentración de nitrato en la solución del suelo. Se puede calcular un índice de lixiviación en función de la precipitación y del tipo de suelo para cuantificar el riesgo de lixiviación.

24.1. INTRODUCCIÓN

La fuente original de N para las plantas terrestres es el gas N_2 que constituye el 78% de la atmósfera. Como las plantas no pueden convertir N_2 a proteínas, primero tiene que ser transformado siguiendo una de las siguientes rutas:

1. Fijación por microorganismos que viven en simbiosis con las raíces de las leguminosas.
2. Fijación por microorganismos libres del suelo.
3. Fijación como óxidos por descargas eléctricas en la atmósfera.
4. Fijación como NH_3, NO_3^- o CN_2^{2-} por los fabricantes de fertilizantes.

La contribución de N_2 atmosférico se encuentra en equilibrio dinámico con las formas fijas en el suelo. Mientras el N_2 se fija por varios procesos, otros procesos químicos y microbiológicos liberan N_2 a la atmósfera (Fig. 24.1). A excepción de la fijación industrial o de la combustión, todos los demás procesos son naturales, pero pueden ser alterados por el manejo del suelo y del cultivo.

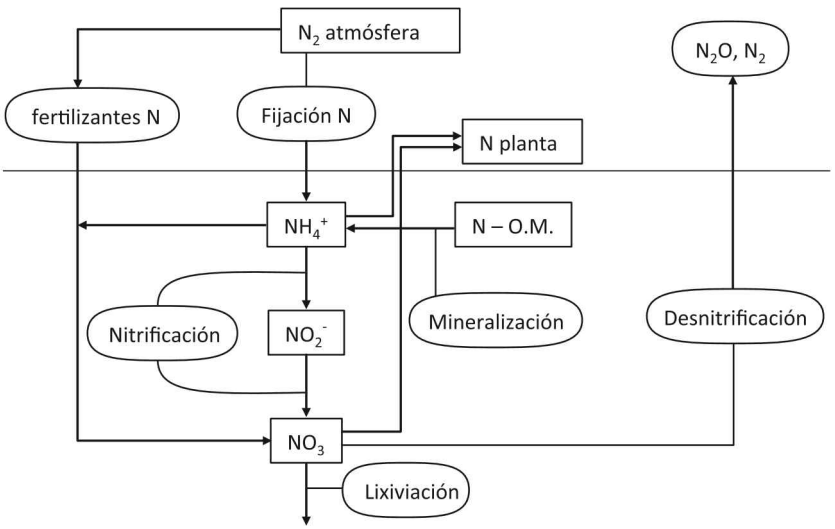


Figura 24.1. Ciclo del nitrógeno

La comprensión del ciclo del N en el sistema suelo-cultivo es la clave para optimizar el manejo de los fertilizantes de nitrógeno, maximizar los rendimientos y minimizar los impactos ambientales negativos sobre el agua (contaminación por nitratos) y la atmósfera (emisiones de gases de efecto invernadero). Las fuentes de N para los cultivos son los fertilizantes inorgánicos y orgánicos y la fijación simbiótica de N_2.

Aunque el N_2 en la atmósfera puede ser considerado una fuente infinita de N para la producción de fertilizantes, este proceso industrial requiere enormes cantidades de

energía. De este modo, el N para la producción industrial de fertilizantes minerales no puede ser considerado un recurso renovable ya que depende de un alto consumo de energía que se obtiene principalmente de recursos no renovables.

24.2. FORMAS DEL N EN EL SUELO

La concentración de N del suelo varía de 0.02% (subsuelo) a 2.5% (turba) con un intervalo típico de 0.03-0.4%. Este N puede ser inorgánico u orgánico, siendo este último la forma predominante.

El N orgánico aparece como proteínas, aminoácidos, aminoazúcares y otros compuestos nitrogenados. Las formas inorgánicas incluyen amonio (NH_4^+), nitrito (NO_2^-), nitrato (NO_3^-), óxido nitroso (N_2O), óxido nítrico (NO) y N_2. Los tres primeros son importantes desde el punto de vista de la fertilidad y se derivan de fertilizantes o proceden de la mineralización de la materia orgánica. Las otras tres formas son gases que se pierden como resultado de la desnitrificación.

24.3. LAS FORMAS DEL N ABSORBIDAS POR LAS PLANTAS

Las plantas absorben el NH_4^+ y NO_3^- aunque a menudo la presencia de ambos mejora la nutrición. La concentración de nitrato es generalmente más alta que la de amonio y el NO_3^- se encuentra en la solución del suelo, por lo que llega a las raíces con el flujo de agua (flujo por transporte de masas). La preferencia por una u otra forma de N inorgánico depende de la especie, la edad de la planta, las condiciones ambientales y otros factores. Por ejemplo, los cereales y la remolacha absorben bien NH_4^+ y NO_3^-. Las solanáceas (patata, tabaco, tomate) se benefician de una alta relación NO_3^-/ NH_4^+ en la solución del suelo. Las especies adaptadas a suelos ácidos aguantan bien una baja relación NO_3^-/ NH_4^+, ya que el amonio tiende a acumularse debido a la desaceleración de la nitrificación en ambientes ácidos.

En términos de energía, la absorción de NO_3^- es menos eficiente que la de NH_4^+, ya que el nitrato tiene que ser reducido a amonio antes de que el N se convierta en parte de los compuestos orgánicos. Sin embargo, la absorción de amonio conduce a la acidificación de la rizosfera y disminuye la absorción de Ca^{2+}, Mg^{2+} y K^+ mientras que aumenta la absorción de $H_2PO_4^-$, SO_4^{2-} y Cl^-. Por otro lado, el nitrato absorbido es co-transportado con H^+ contribuyendo así a la alcalinización de la rizosfera y del apoplasto, lo que puede disminuir la absorción de Fe por las plantas. Las plantas absorben también pequeñas cantidades de N orgánico principalmente en forma de aminoácidos, sin embargo, no existen evidencias de que el N orgánico contribuya significativamente a la nutrición nitrogenada de la planta.

24.4. LA FIJACIÓN SIMBIÓTICA DE N

La fijación simbiótica de N implica la reducción de nitrógeno atmosférico a NH_3 por una enzima (nitrogenasa) presente en microorganismos aeróbicos (principalmente

bacterias del género *Rhizobium)* que forman nódulos en las raíces de las leguminosas. Durante siglos esta fue la principal fuente de N en la agricultura, pero el aumento de la disponibilidad y mejores precios de los fertilizantes sintéticos de N ha reducido la importancia de esta fuente.

La simbiosis *Rhizobium*-leguminosa se caracteriza por su especificidad, es decir, cada especie *de Rhizobium* sólo infecta a una especie de leguminosa. Por lo tanto, a menudo es necesario inocular las semillas con la especie o cepa adecuada de *Rhizobium.*

La mera presencia de nódulos en las raíces no implica que ocurra fijación. Por ejemplo, en alfalfa los nódulos activos son grandes (2-4 x 4-8 mm) y se agrupan en las raíces primarias. El color rojo en el interior de los nódulos indica la presencia de leghemoglobina, un portador del N y O_2 requerido para la actividad del *Rhizobium.*

Los factores que afectan a la tasa de fijación de N por *Rhizobium* son el pH, la concentración de nutrientes en el suelo, la actividad fotosintética, el clima y el manejo del cultivo. La acidez del suelo restringe la presencia y actividad de *Rhizobium*, aunque existen grandes diferencias en la sensibilidad a la acidez de las diferentes especies e incluso razas. Por ejemplo, un pH por debajo de 6 reduce drásticamente el número de nódulos de *R. meliloti* en las raíces de alfalfa, mientras que pH entre 5 y 7 apenas afecta la nodulación de *R. trifoli* en el trébol.

Un exceso de NO_3^- en el suelo reduce la actividad de la nitrogenasa y por lo tanto la fijación de N. La fijación máxima se produce cuando hay poco N inorgánico disponible en el suelo. Sin embargo, a menudo se recomiendan pequeñas dosis de fertilizante nitrogenado para asegurar un buen establecimiento de las plántulas de leguminosas mientras se completa la nodulación por *Rhizobium.* También pueden ser necesarias aplicaciones de N en el comienzo de la primavera, cuando la demanda de N por la planta es superior a la oferta por *Rhizobium,* debido, por ejemplo, a las bajas temperaturas. En algunas leguminosas (*Phaseolus*) la fijación es tan pobre que es necesario aplicar fertilizante nitrogenado sistemáticamente.

En general, una alta actividad fotosintética se relaciona con alta fijación de N, y por lo tanto el estrés hídrico, las bajas temperaturas o cualquier otro tipo de estrés que reduzca la actividad fotosintética también disminuirá la fijación simbiótica.

24.5. CUANTIFICACIÓN DE LA FIJACIÓN DE N

Los cultivos perennes fijan entre 110 y 225 kg N/ha/año, aunque los valores pueden estar por encima o por debajo de ese rango dependiendo de las condiciones ambientales. Las leguminosas anuales fijan entre 50 y 110 kg N/ha/año.

Como primera aproximación, la cantidad de N fijada por un cultivo de leguminosas, se puede estimar como:

$$N_{fixed} = (1 + f_{NR})\ Y\ \left(NC_{yield} + \frac{1 - HI}{HI} NC_{res}\right) F_{NBF} \tag{24.1}$$

donde f_{NR} es el cociente entre N en las raíces y N en la parte aérea, Y es el rendimiento, NC_{yield} y NC_{res} son las concentraciones de N en el producto cosechado y los residuos, respectivamente (Tabla 24.1), HI es el índice de cosecha y F_{NBF} es la fracción de N que procede de la fijación biológica. El valor de f_{NR} se encuentra entre 0.05 y 0.25, mientras F_{NBF} depende en gran medida de la disponibilidad de N en el suelo, que a su vez está relacionada con la dosis de fertilizantes y el tipo de leguminosa. Cuando la disponibilidad de N en el suelo es baja, la mayor parte del N acumulado procede de fijación (Tabla 24.2). Si el contenido de materia orgánica es alto se deben utilizar los valores más bajos de los intervalos propuestos. Por otra parte, las concentraciones de N en el producto cosechado y los residuos pueden ser medidos o tomados de la Tabla 24.1.

Tabla 24.1. Concentración de N (% sobre materia seca) en diferentes especies cultivadas. Los valores máximos y mínimos se muestran para algunas especies. También se indica el contenido de materia seca (MS, % sobre peso fresco).

Especie	MS%	N min	N max	N típica		MS%	N min	N max	N típica
Alfalfa (heno)	85.0	2.80	3.80	3.30					
Manzano	18	0.25	0.45	0.35					
Cebada	88.5	1.50	1.80	1.60	paja	90	0.58	0.88	0.70
Judía (Phaseolus) (seca)	89	3.50	4.50	4.00	paja	89	1.10	1.40	1.20
Algodón	91	2.32	2.75	2.53	residuos	92.5	0.90	1.00	0.98
Vid (vino)	19	0.50	0.60	0.57					
Lechuga	6	4.00	4.40	4.27					
Maíz (grano)	30	1.10	1.45	1.25					
Mijo	89.5			2.00	paja	91.5			0.80
Olivo	50	0.20	0.40	0.30	vegetativo	70	1.00	2.00	1.50
Naranjo	18	1.00	1.40	1.20					
Palmera	79			1.25					
Melocotón	12	0.80	1.20	1.00					
Guisante (seco)	90	4.00	4.30	4.20	paja	88.5	1.20	1.40	1.30
Patata	23.5	1.20	1.90	1.60	residuos	51	2.00	2.40	2.20
Colza	91	3.40	4.30	3.90	residuos	82.5	0.55	0.90	0.80
Arroz	94			1.33					
Sorgo (grano)	87.5	1.45	2.00	1.90	paja	92	0.60	0.80	0.70
Soja	87.5	6.10	6.90	6.50	residuos	89	1.00	1.00	0.85
Remolacha azucarera	21	0.90	1.10	1.05	residuos	18	1.80	2.80	2.30

Caña de azúcar (virgen)	25			0.13		26			0.41
Girasol	91.5	2.20	3.20	2.95	residuos	87	0.40	1.10	0.80
Tomate	6	2.30	3.10	2.60		20			1.80
Trigo invierno	87.5	1.85	2.30	2.10	paja	90.5	0.40	0.85	0.65

Ejemplo 24.1.

El rendimiento esperado de un cultivo de alfalfa es de 8 t/ha (15% de humedad) en un suelo con 1% de materia orgánica. El N inorgánico inicial en el suelo es de 40 kg/ha y se espera que la mineralización de N aporte 35 kg de N/ha. Suponemos que el HI es 0.9 y que los residuos tienen la misma concentración de N que la parte cosechada.

En la Tabla 24.1 se encuentra que la concentración de N de la alfalfa es de 3.3 kg de N/100 kg de materia seca. Como el contenido de agua es del 15%, la biomasa cosechada es de 6800 kg de materia seca/ha.

El N disponible en el suelo será la suma del N inorgánico inicial (40 kg/ha) y la cantidad esperada de mineralización de N (35 kg/ha):

40 kg N/ha + 35 kg N/ha = 75 kg N/ha

Así que estamos en el intervalo 55-110 kg/ha de la Tabla 24.2, lo que implica que el 60-90% de N viene de fijación. Como el contenido de materia orgánica es bajo (1%) utilizamos el límite superior (0.90). También tomamos f_{NR} = 0.2, lo que significa que el N fijado total es:

$$N_{fixed} = (1 + f_{NR})\ Y\ \left(NC_{yield} + \frac{1 - HI}{HI} NC_{res}\right) F_{NBF}$$
$$= (1 + 0.2)\ 6800\ \left(0.033 + \frac{0.1}{0.9}\ 0.033\right)\ 0.9 = 270\ kgN/ha$$

Tabla 24.2. Porcentaje de N acumulado en el cultivo procedente de fijación simbiótica en las leguminosas en función del tipo de leguminosa, del % de materia orgánica y del N inorgánico en el suelo. Adaptado de Meisinger y Randall (1991).

OM%	Tipo	N inorgánico disponible (kg N/ha)			
		55	55-110	110-225	> 225
> 3	Anual	70	50	30	5
	Perenne	80	60	50	10
<3	Anual	95	80	60	40
	Perenne	95	90	80	50

24.6. LAS TRANSFORMACIONES DEL N EN EL SUELO

24.6.1. La mineralización y la inmovilización

Los materiales vegetales muertos (hojas secas, residuos que quedan después de la cosecha) sufren un proceso de descomposición, en el que se rompe la estructura por lo que queda como materia orgánica irreconocible. Este proceso se lleva a cabo por bacterias y hongos que obtienen energía de la respiración de los compuestos de carbono del residuo. La velocidad de descomposición aumenta con la temperatura hasta 32-35ºC y con el contenido de agua hasta capacidad de campo, por lo que cabe esperar una descomposición más rápida si el residuo está enterrado en el suelo. En general, la velocidad de descomposición es proporcional a la concentración de N en el residuo, lo que explica la descomposición más rápida de los residuos de las leguminosas, en comparación con la de los cereales.

La mineralización del N es la conversión de N orgánico a NH_4^+. Después de la descomposición de los residuos vegetales, la mineralización del N ocurre en dos etapas, aminización (ruptura de las proteínas en aminoácidos, aminas y urea, con liberación de CO_2) y amonización (conversión de aminas y aminoácidos a NH_4^+). Esta transformación se lleva a cabo por microorganismos heterótrofos (hongos y bacterias), y se basa en respiración aerobia y en menor medida, anaerobia.

La mineralización se ve favorecida por un alto contenido de agua del suelo, sin llegar a la saturación, para garantizar el suministro de oxígeno (Figura 24.2). La descomposición también se produce en condiciones de encharcamiento, aunque a un ritmo menor. Al igual que la mayoría de los procesos biológicos, la mineralización se ve afectada por la temperatura. El coeficiente de temperatura, Q_{10}, para la mineralización es 2 en el intervalo de 5 a 35ºC, es decir, la tasa de mineralización se duplica al elevar la temperatura 10ºC. La temperatura óptima es de alrededor de 35ºC (Fig. 24.3).

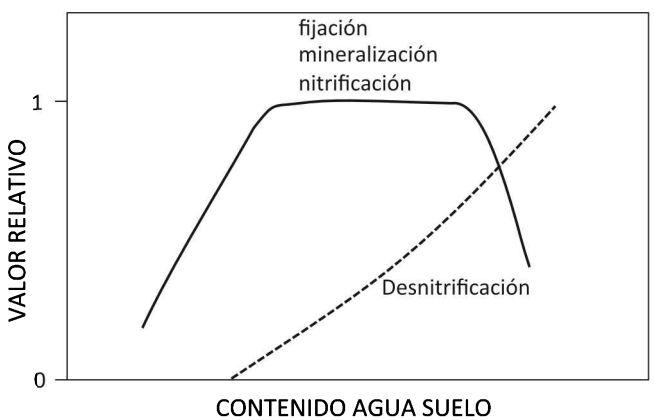


Figura 24.2. Respuesta de la fijación de N, mineralización de N y nitrificación al contenido de agua del suelo.

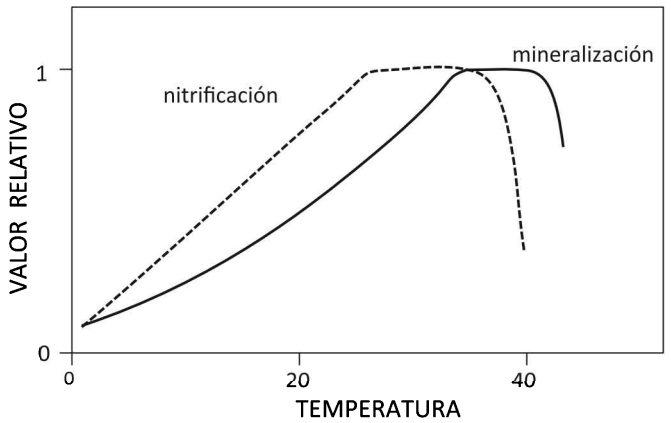


Figura 24.3. Respuesta de la mineralización de N y de la nitrificación a la temperatura del suelo.

La inmovilización es la conversión de N inorgánico (NH_4^+ y NO_3^-) a N orgánico, siendo básicamente el proceso inverso de la mineralización. Si la materia orgánica en descomposición contiene poco N en relación a C, los microorganismos usan (inmovilizan) N mineral del suelo. Los microorganismos requieren una relación C:N de aproximadamente 8:1, por lo que el N inorgánico del suelo puede disminuir rápidamente durante la descomposición de residuos y el cultivo puede experimentar deficiencia de N. Cuando el residuo con bajo contenido de N se termina de descomponer, la disponibilidad de C como fuente de energía para los microorganismos se reduce y disminuye la actividad microbiana, terminando así la inmovilización N.

El proceso predominante (mineralización o inmovilización) depende de la relación C:N de la materia orgánica que se descompone. Al comienzo de la descomposición de los residuos orgánicos, hay una población en rápido crecimiento de microorganismos heterótrofos que se detecta por el aumento de la liberación de CO_2. Si la relación C:N es mayor que 30:1, se produce inmovilización. A medida que avanza la descomposición, la fuente de C disminuye, y también lo hace la relación C:N, hasta que los microorganismos comienzan a morir. Por último, se alcanza un nuevo equilibrio que se inicia con la mineralización de N y termina con un nivel más alto de N inorgánico y una relación C:N de alrededor de 10:1. El tiempo necesario depende de la cantidad de residuo orgánico añadido, de la disponibilidad de N inorgánico, de la resistencia del residuo a ser descompuesto (es decir, su contenido de lignina), del contenido de agua y de la temperatura del suelo.

Ejemplo 24.1.

Después de la cosecha de un cereal incorporamos 3000 kg/ha de paja con 45% de C y 0.75% N (C:N = 60:1) en el suelo. Las cantidades totales de C y N son:

3000 kg/ha x 0.45 = 1350 kg C/ha

3000 kg/ha x 0.0075 = 22.5 kg N/ha

Suponemos que 35% de C se puede utilizar en el crecimiento de los microorganismos, mientras que el 65% del C se pierde como CO_2 respirado. La acumulación de C en la biomasa microbiana será:

1350 kg C/ha x 0.35 = 472.5 kg C/ha

La relación C:N de los microorganismos es 8:1 de modo que el N acumulado será:

472.5 kg/ha / 8 = 59 kg N/ha

Y la cantidad de N inmovilizado es:

59 kg N/ha – 22.5 kg N/ha =36.5 kg N/ha

La relación C:N en la capa superficial de un suelo natural es de 8-12, siendo 10 el valor más común. Estos suelos tienen una población de microorganismos relativamente estable y la descomposición de residuos orgánicos (y por tanto la mineralización) también es constante. Si este suelo es labrado se producirá un rápido aumento de la descomposición y de la mineralización lo que disminuirá el contenido de materia orgánica.

Ejemplo 24.1.

Un suelo tiene 2.0% de materia orgánica en su capa superficial (0.20 m) y la densidad aparente es 1.3 t/m^3. La concentración de N en la materia orgánica es del 5%. Por lo tanto, la cantidad total de N orgánico en esa capa es:

1.3 10^3 kg suelo/m^3 suelo x 0.20 m x 10^4 m^2/ha x 0.02 kg MO/kg suelo x 0.05 kg N/kg MO = 2600 kg N orgánico/ha

Si la tasa de mineralización es del 1%/año, la cantidad de N inorgánico liberado será:

2600 kg N orgánico/ha x 0.01 kg N/ kg N orgánico /año = 26 kg N/ha/año

24.6.2. La nitrificación

La transformación de NH_4^+ a NO_3^-, llamada nitrificación, se lleva a cabo por bacterias *(Nitrosomonas* y *Nitrobacter)* en 2 etapas:

$NH_4^+ + O_2 \rightarrow NO_2^- + H_2O + H^+$ (*Nitrosomonas*)

$NO_2^- + O_2 \rightarrow NO_3^-$ (*Nitrobacter*)

Tanto *Nitrosomonas* como *Nitrobacter* son bacterias autótrofas, aunque en ambos procesos también están involucrados algunos organismos heterótrofos. La segunda etapa es más rápida que la primera, lo que evita la acumulación de NO_2^- que es tóxico para las plantas.

Entre los factores que afectan a la velocidad de nitrificación, el principal es la concentración de sustrato (NH_4^+) que depende de la fertilización y de la mineralización. La necesidad de oxígeno en las reacciones indicadas anteriormente significa que se requiere una buena aireación (la concentración óptima de oxígeno es 20%), por lo que no es deseable el encharcamiento. Sin embargo, la nitrificación es elevada con contenido de agua relativamente alto, y se maximiza cuando el 80-90% de los poros están llenos de agua. La temperatura óptima para la nitrificación es de 25-35ºC. En general se acepta que la nitrificación es óptima a pH del suelo desde neutro a ligeramente alcalino, pero la nitrificación puede ocurrir en el intervalo de 4.5 a 10 (Fig. 24.4). Un efecto secundario de la aplicación de cal a los suelos ácidos es la mejora de la nitrificación y de la mineralización lo que contribuye a un aumento de la oferta de N a los cultivos. El producto de la nitrificación NO_3^- es muy soluble en agua y es difícilmente adsorbido por los coloides del suelo por lo que puede perderse por lixiviación.

El manejo de los fertilizantes nitrogenados ha de tener en cuenta los hechos expuestos anteriormente. En las regiones con bajas temperaturas del suelo y/o escasez de precipitaciones en invierno, las aplicaciones de NH_4^+ en el otoño, antes de la siembra, ahorran tiempo y dinero. Si las temperaturas del aire son inferiores a 4-5ºC o la temperatura del suelo es inferior a 10ºC, las aplicaciones de amonio en presiembra en el otoño son eficientes ya que las tasas de nitrificación son bajas. En caso contrario, suelen ser muy poco eficientes.

La actividad de *Nitrosomonas* es muy sensible a la presencia de un gran número de compuestos. Debido a eso, la industria de fertilizantes ha desarrollado sustancias llamadas inhibidores de la nitrificación que se mezclan con los gránulos de fertilizante o se añaden a los estiércoles o purines. Los inhibidores ralentizan el proceso de nitrificación, controlando la acumulación de nitratos en el suelo y por lo tanto las pérdidas de nitratos. Estos compuestos tienen que ser biodegradables y en muchos países sólo pueden ser comercializados cuando se mezclan con los fertilizantes.

24.6.3. La desnitrificación

La desnitrificación no es lo contrario de la nitrificación, sino la reducción de nitrato a compuestos gaseosos de N. Cuando la disponibilidad de oxígeno del suelo se reduce a causa del alto contenido de agua, de la compactación del suelo o de la aplicación de materia orgánica de fácil descomposición, se favorece el aumento de la desnitrificación. Aparecen micro-zonas anaerobias que contienen todavía una fuente de C lábil y en ellas proliferan un amplio número de microorganismos (principalmente bacterias como *Pseudomonas, Bacillus* y *Paracoccus,* pero también algunos hongos) que son capaces de emplear NO_3^- y NO_2^- como aceptores de electrones, liberando compuestos gaseosos de N hacia la atmósfera:

$NO_3^- > NO_2^- > N_2O > NO > N_2$

La reducción incompleta promueve la emisión de N_2O, un gas muy reactivo que contribuye a la destrucción del ozono y a la capacidad de calentamiento de la atmósfe-

ra. La reacción es muy rápida y se observan picos de emisión de N_2O después de la aplicación de fertilizantes orgánicos o inorgánicos. Antes se pensaba que la desnitrificación requería condiciones de encharcamiento, pero hoy en día se reconoce como vía principal de pérdida de N hacia la atmósfera bajo una amplia gama de condiciones ambientales.

Entre los factores que afectan a la desnitrificación, el contenido de agua del suelo es uno de los más importantes. El encharcamiento impide la difusión del oxígeno y por lo tanto aumenta la desnitrificación (Tabla 24.3). Debido a eso las mayores pérdidas de desnitrificación se han medido en arrozales, con pérdidas de hasta 16 kg de N/ha en el día después de la saturación del suelo. Una estrategia para controlar las pérdidas en arrozales es la aplicación de fertilizantes a base de urea o amonio. El N se mantendrá en el suelo como NH_4^+ y sólo pequeñas cantidades se transforman en NO_3^-en la proximidad de las raíces, donde hay oxígeno disponible, y por lo tanto, la desnitrificación será lenta debido a la falta de sustrato. En suelos bien aireados, sin embargo, la tasa de nitrificación es alta y la desnitrificación sólo ocurrirá en micro-zonas anaerobias del suelo (p.ej. estiércol). Se debe tener cuidado cuando se combinan fertilizantes nitrogenados con la aplicación de estiércol ya que la desnitrificación puede aumentar considerablemente reduciendo la eficiencia del fertilizante. Recientemente, se ha identificado una fuga en la primera etapa de la nitrificación

Tabla 24.3. Pérdidas por desnitrification (% de N inorgánico) para diferentes casos y tipos de suelo en función del contenido de materia orgánica. Adaptado de Meisinger y Randall (1991)

Caso	OM%	Cultivos de secano en zonas áridas y semiáridas					Cultivos de regadío o en zonas húmedas				
		Tasa de drenaje									
		Muy alta	alta	media	baja	Muy baja	Muy alta	alta	media	baja	Muy baja
N de fertilizante. Con laboreo	<2	2	3	4	6	10	4	9	14	20	30
	2-5	3	4	6	10	15	9	16	20	25	45
	> 5	4	6	10	15	25	12	20	25	35	55
N de fertilizante. Sin laboreo	<2	3	4	6	10	10	9	14	20	30	30
	2-5	4	6	10	15	15	16	20	25	45	45
	> 5	6	10	15	25	25	20	25	35	55	55
N de estiércol. Labrado (*)	<2	4	6	8	12	20	8	18	28	40	60
	2-5	6	8	12	20	30	18	32	40	50	90
	> 5	8	12	20	30	50	24	40	50	70	95

* Los mismos valores se aplican a N de los fertilizantes en suelos labrados cuando una capa impermeable compactada está presente debajo de la profundidad labrada.

como una fuente de N_2O, lo que añade incertidumbre a las emisiones gaseosas en suelos bien aireados. La cuantificación de la desnitrificación se complica ya que es difícil de distinguir N_2O del N_2 atmosférico, de manera que usamos la Tabla 24.3 que muestra el efecto de la materia orgánica en la tasa de desnitrificación para diferentes tipos de suelo.

Muchas de las bacterias responsables de la desnitrificación son muy sensibles a la acidez (Fig. 24.4). Por lo tanto, en suelos con pH inferior a 5, la desnitrificación es insignificante, mientras que puede ser alta en suelos básicos. Sin embargo, en suelos con pH>7 el N tiende a reducirse a N_2 mientras que en los suelos ácidos la mayoría de las pérdidas ocurren como N_2O. Por otra parte, la desnitrificación es muy sensible a la temperatura y aumenta rápidamente a medida que la temperatura del suelo va de 2ºC a 50ºC, por encima de la cual se inhibe.

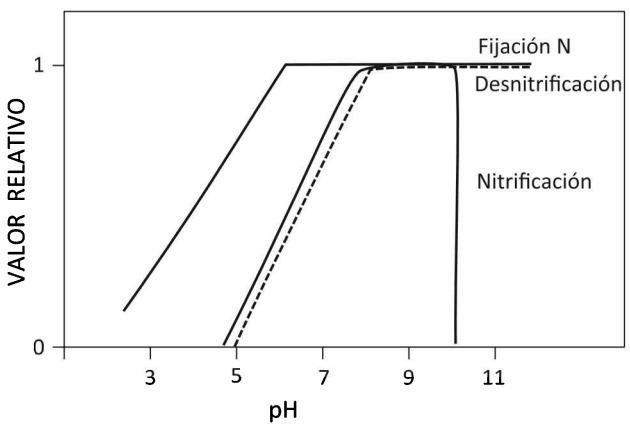


Figura 24.4. Respuesta de la fijación de N, la nitrificación y la desnitrificación al pH del suelo.

24.6.4. La volatilización de amoniaco

El ion amonio en solución está en equilibrio con el amoniaco (NH_3) que es volátil. La volatilización de amoniaco se produce naturalmente en los suelos pero a ritmo lento. Sin embargo, las pérdidas por volatilización de fertilizantes con N pueden ser muy importantes, dependiendo del tipo de abono, de la forma de aplicación, de la capacidad de intercambio catiónico y de factores climáticos (Tabla 24.4). El conjunto de condiciones para las que las pérdidas de amoníaco son mayores sería la aplicación superficial de urea en un suelo con pH básico y baja CEC en condiciones secas. El riesgo de volatilización también puede ser alto con la aplicación superficial de los fertilizantes orgánicos y una fracción relevante de N está en forma de amonio. Para reducir la volatilización de amoniaco, se deben incorporar los fertilizantes de urea/amonio/estiércol mediante labor o riego dentro de los 2 días después de la aplicación.

Tabla 24.4. Pérdidas por volatilización de amoniaco (% del N aplicado) para los suelos en función del pH, la capacidad de intercambio catiónico (CEC) y las condiciones climáticas. Adaptado de Meisinger y Randall (1991)

			alta CEC> 250 meq/kg			baja CEC <100 meq/kg (*)		
	Fuente de N	Método de aplicación	Precipitación después de la aplicación y tipo de clima					
			> 12 mm en 2 días	<6 mm en 7 días	Sin lluvia en 7 días	> 12 mm en 2 días	<6 mm en 7 días	Sin lluvia en 7 días
			húmedo	sub-húmedo	seco	húmedo	sub-húmedo	seco
pH> 7	Urea	Superficial	0	2	2	20	30	40
		Localizado en superficie	0	2	2	15	20	30
		Incorporado	0	0	0	10	10	10
	Sulfato amónico	Superficial	0	2	5	40	50	60
		Incorporado	0	0	0	10	20	30
	Nitrato amónico	Superficial	0	2	5	20	25	30
		Incorporado	0	0	0	10	15	20
	Amoniaco anhidro	Inyectado	0	0	0	2	3	5
pH <7	Urea	Superficial	0	5	5	5	30	40
		Localizado en superficie	0	2	2	5	20	30
		Incorporado	0	0	0	0	2	2
	Sulfato amónico	Superficial	0	0	0	0	2	2
		Incorporado	0	0	0	0	2	2
	Nitrato amónico	Superficial	0	0	0	0	2	2
		Incorporado	0	0	0	0	2	2
	Amoniaco anhidro	Inyectado	0	0	0	0	2	2

* Los mismos valores se aplican en suelos no labrados con cobertura de residuos en superficie de más del 50%.

Los rangos generales de pérdidas por volatilización de amoniaco de los fertilizantes son 2-50% (pH>7) y 0-25% (pH<7). El equilibrio NH_3/NH_4^+ es dependiente del pH. En condiciones ácidas y neutras el equilibrio se desplaza hacia NH_4^+ lo que explica las pérdidas más bajas.

24.7. ABSORCIÓN DE N POR LOS CULTIVOS

El N es un nutriente esencial para los cultivos. Es un constituyente de las proteínas, los ácidos nucleicos y otros metabolitos intermedios. Si el suministro de N es limitante, el crecimiento del cultivo se reduce y también lo hará la interceptación de radiación. Una deficiencia más severa de N lleva a reducir la eficiencia en el uso de la radiación. Por lo tanto la disponibilidad de N limitará la acumulación de biomasa y el rendimiento. Hay un rango de concentración óptima de N, por encima del cual el exceso puede causar disminución de rendimiento. Por ejemplo, en cultivos indeterminados, la alta concentración de N promueve el crecimiento vegetativo a expensas de crecimiento reproductivo lo que se traduce en un menor índice de cosecha. A nivel global, el N es el segundo factor limitante (después del agua) en la producción de los cultivos.

La absorción de N es paralela a la acumulación de biomasa por lo que muestra una curva sigmoidea típica con un aumento exponencial inicial seguida por una fase de acumulación lineal rápida. En esta fase rápida, la acumulación puede ser de hasta 3-5 kg N/ha/día. Las concentraciones de N en los diferentes órganos son altas cuando las plantas son jóvenes y disminuyen con la edad. Por lo tanto, la respuesta del cultivo al N no sólo depende de la cantidad absorbida, sino también de la capacidad de translocación a los órganos en crecimiento (y finalmente al grano o parte cosechable).

En la mayoría de los cultivos, la concentración de N disminuye con el aumento de biomasa aérea y esa disminución se representa mediante una función potencial con exponente negativo llamada curva de dilución de nitrógeno (Figura 24.5). La curva de dilución de nitrógeno crítica ha sido determinada para muchas especies ($NC_{crit} = a\ B^{-b}$) usando datos de concentración de N y de biomasa bajo diferentes regímenes de fertilización. La concentración crítica de N de un cultivo (NC_{crit}) se define como la concentración mínima de N en el cultivo (%) que permite una producción máxima de biomasa. El coeficiente *a* es la concentración de N de los cultivos cuando la biomasa es igual a 1 t/ha, y *b* es un parámetro adimensional que determina la pendiente de la relación. La curva de dilución de N crítica se puede utilizar para determinar el estado de nutrición de N de los cultivos: si la concentración de N del cultivo está cerca de la NC_{crit} correspondiente a la biomasa actual, entendemos que el N no es limitante para el crecimiento del cultivo, mientras que cuando está por debajo nos indica una deficiencia de N. La relación entre la concentración real y la concentración crítica para una biomasa dada se denomina el índice de nutrición de N (NNI):

$$NNI = \frac{NC_{actual}}{NC_{crit}} = \frac{NC_{actual}}{a\ B^{-b}} \tag{24.2}$$

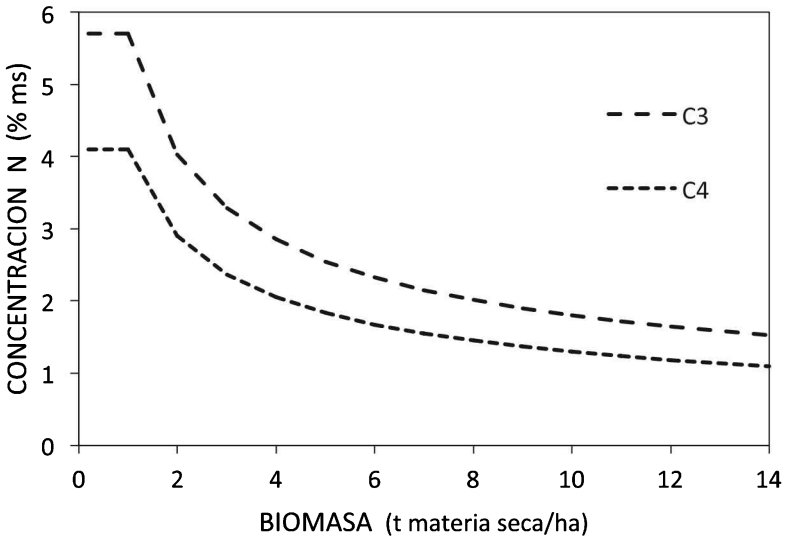


Figura 24.5. Curva de concentración de nitrógeno crítica para diversos cultivos. Adaptado de Gastal F. y Lemaire G. (2002). J Exp Bot 53: 789-799

donde B es la biomasa del cultivo (t/ha). En general, las especies C4 tienen una NC_{crit} inferior para una biomasa dada que las especies C3, lo que presumiblemente se relaciona con un menor contenido de proteínas fotosintéticas. Las curvas de dilución son generalmente aceptadas debido a su simplicidad para modelizar el crecimiento de los cultivos durante la etapa vegetativa, sin embargo, cuando otro factor distinto al N limita el crecimiento (p.ej. déficit hídrico, enfermedad) la curva puede apartarse considerablemente del modelo. El requisito de tomar muestras destructivas para medir la biomasa y la necesidad de adaptar la curva de dilución a las condiciones locales específicas o a las características de los cultivares, hacen difícil la adopción de curvas de dilución como herramienta de manejo. Otras técnicas basadas en el estado del N en los cultivos han sido desarrolladas para establecer recomendaciones de fertilización y serán discutidas en el Capítulo 25.

La relación entre el rendimiento y la absorción de N es en general lineal hasta que se alcanza el rendimiento máximo. A partir de ese punto, si hay N disponible en el suelo, la absorción continúa, pero no resulta en un mayor rendimiento. Este límite depende de las condiciones ambientales y del manejo del cultivo. La Figura 24.6 muestra una relación lineal entre el rendimiento y la absorción de N para un experimento llevado a cabo con girasol en Córdoba con diferentes niveles de riego y fertilizante nitrogenado. Los rendimientos máximos, en los que se satura la relación rendimiento-absorción de N, aumentan con el nivel de riego. Por lo tanto, a pesar de la relación lineal entre el rendimiento y la absorción de N cuando ningún otro factor es limitante, es importante establecer el rendimiento objetivo para definir el nivel máximo de absorción de N.

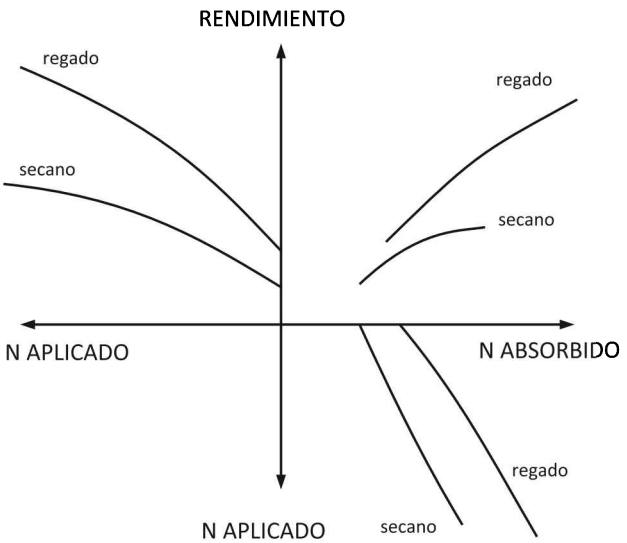


Figura 24.6. Respuesta del rendimiento de girasol al N aplicado y a la absorción de N.

Para un conjunto de condiciones ambientales, la relación entre el rendimiento y la aplicación de N es curvilínea (Fig. 24.6). Por lo tanto, la eficiencia aparente del fertilizante de N disminuye con el aumento de la dosis. Cuando esta dosis alcanza un cierto valor, un aumento del fertilizante no da como resultado un aumento del rendimiento, y en algunos casos puede incluso ser perjudicial. Además, la cantidad de N residual en el suelo será mayor, lo que aumenta el riesgo de lixiviación de nitratos.

La respuesta del rendimiento al N aplicado depende de la disponibilidad inicial de N del suelo y del potencial de mineralización durante el ciclo, además del potencial productivo del cultivo. Así, en suelos muy fértiles, el cultivo puede no responder a la aplicación de N o la respuesta puede ser negativa. Si otro factor (p.ej. agua) es limitante, una aplicación abundante de N no traerá aumentos de rendimiento. La Figura 24.6 ilustra este comportamiento en el experimento de girasol mencionado anteriormente. Conforme la cantidad de riego fue mayor, también lo fueron los rendimientos para cualquier dosis de N. La respuesta a la aplicación de N también fue mayor bajo riego, al menos para bajas dosis de N.

Como un marco para entender las respuestas a la fertilización, de Wit propuso representar en diferentes cuadrantes las curvas de absorción de N y rendimiento en respuesta a la aplicación de N (Fig. 24.6). En el cuadrante (a) el rendimiento se representa frente al N aplicado para diferentes regímenes de riego del experimento con girasol. Este rendimiento corresponde a una cantidad de N absorbido (cuadrante b), que a su vez corresponde a una cantidad de N aplicado (cuadrante c). Cada línea del cuadrante inferior se caracteriza por su pendiente y su ordenada en el origen. Vemos que ambos parámetros aumentaron con el riego aplicado. Esto significa que el riego aumenta la disponibilidad de N, ya sea porque el agua de riego contenía nitrato, porque la mineralización fue acelerada por el riego o porque la absorción

de N fue facilitada en un suelo más húmedo. Además, conforme aumentó el nivel de riego, las curvas de absorción de N no mostraron saturación, es decir, no se llegó a un límite máximo de absorción de N. El agua y el N son los principales factores limitantes en muchos cultivos regados y se debe realizar un manejo conjunto para un buen funcionamiento del cultivo.

En cualquier caso, el criterio para elegir la cantidad de fertilizante nitrogenado debe ser económico, es decir, la cantidad óptima será aquella que resulte en el máximo beneficio. Esta cantidad será menor que la requerida para el máximo rendimiento y se puede calcular como el punto en el que el beneficio marginal es cero.

Los resultados del experimento de girasol mencionados anteriormente contrastan con otros experimentos anteriores sobre la fertilización del girasol en Córdoba, que no mostraron respuesta a la fertilización nitrogenada. Cabe señalar que en el experimento mencionado el suelo había sido "limpiado" de N con un cultivo de cereales anterior sin fertilización. Obviamente, las condiciones iniciales de fertilidad y otros factores ambientales (p.ej. el suministro de agua) afectan en gran medida a la respuesta del cultivo a la aplicación de N. Por esta razón, las funciones de producción de rendimiento frente al N aplicado no pueden extrapolarse a otras situaciones. Para ilustrar esta idea en la Fig. 24.7 se muestra la respuesta del trigo a la aplicación de N en un experimento llevado a cabo en secano en tres campos adyacentes en Navarra (España). No se observó respuesta del rendimiento al N aplicado cuando la cantidad de N inorgánico en el suelo (profundidad 0.9 m) antes de siembra fue alta (> 140 kg N/ha). Sí hubo respuesta para cantidades medias (90 kg N/ha) y bajas (30 kg N/ha) de N inorgánico en el suelo. Debido a esto, la determinación de N disponible en muestras de suelo tomadas antes de la siembra o antes de las aplicaciones de cobertera es una práctica recomendada para evitar el exceso de fertilización en muchas regiones.

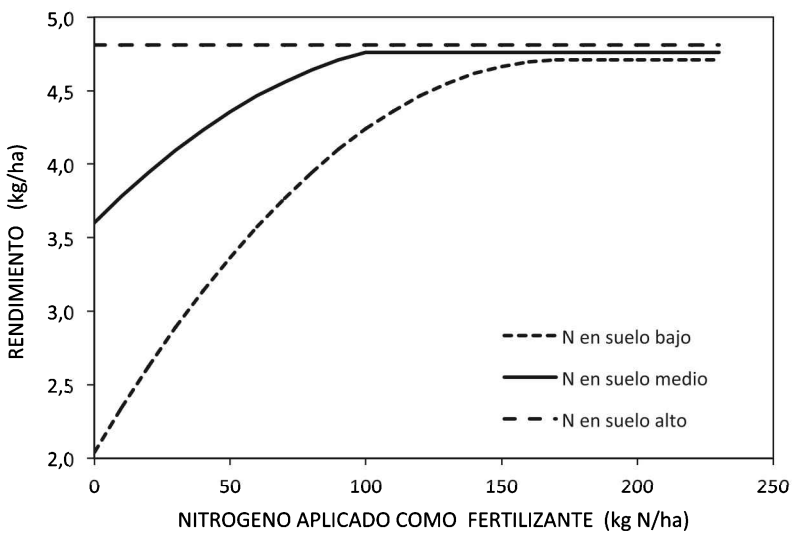


Figura 24.7. Respuesta del rendimiento del trigo a la aplicación de fertilizante nitrogenado según el contenido de N inorgánico del suelo (hasta 0.9 m de profundidad).

24.8. LIXIVIACIÓN DE NITRATOS

Las consecuencias de las pérdidas de N de los sistemas agrícolas a las masas de agua son una preocupación social importante en los países desarrollados, con especial atención a la contaminación de acuíferos por nitratos y a la excesiva disponibilidad de N en lagos y estuarios. Los efectos nocivos potenciales del nitrato sobre la salud humana (cianosis, riesgo de cáncer) han llevado al establecimiento de concentraciones máximas admisibles de nitratos en el agua de 50 g NO_3^- m^{-3} (Organización Mundial de la Salud). La UE y los EE.UU. han identificado regiones afectadas por la contaminación de nitratos y aprobado leyes para prevenirlas (Directivas 2000/60/EC; USA Congress, 1978). Como el principal contribuyente a la contaminación por nitratos es la agricultura, en muchos países se han aplicado restricciones a la utilización de fertilizantes nitrogenados y a las prácticas agrícolas que favorecen la lixiviación de nitratos.

La lixiviación de nitrato se produce por la percolación del agua en el suelo que contiene disueltos los nitratos, por debajo de la zona radicular. Por lo tanto, la lixiviación será proporcional a la percolación profunda y a la concentración de nitrato en la solución del suelo. La percolación profunda dependerá de los componentes del balance de agua (lluvia y riego), de la capacidad de retención de agua del suelo y de su conductividad hidráulica. Los suelos con alta capacidad de retención de agua y de baja conductividad hidraúlica (p.ej. de textura fina) tendrán, por tanto, una menor percolación y un riesgo de lixiviación más bajo. Aparte de las características del suelo y de las condiciones climáticas, los períodos de barbecho entre cultivos sucesivos en la rotación son los más peligrosos para la lixiviación. El nitrato dejado en el suelo tras la recolección y el originado a partir de la mineralización y la nitrificación durante el período de barbecho queda disponible para la lixiviación durante los episodios de percolación después de fuertes lluvias. La ausencia de extracción de agua y nitrato por un cultivo es la condición ideal para mantener un alto riesgo de lixiviación (alto contenido de agua, alta concentración de nitratos). Esto ha llevado a la introducción de cultivos "trampa" para llenar el vacío de los periodos de barbecho, ya que reducen el contenido de agua y absorben el N inorgánico que queda así fijado en forma orgánica. Otras medidas posibles para reducir la lixiviación serían las siembras tempranas (para reducir los períodos de barbecho), reducir las aplicaciones de N en presiembra en el otoño o el uso de fertilizantes de liberación lenta (Capítulo 23). En los cultivos de regadío es muy importante seguir los programas de riego basados en el balance de agua con correcciones al final de la campaña para agotar el agua del suelo tanto como sea posible.

Para evaluar el riesgo de lixiviación podemos utilizar el Índice de Lixiviación (LI, mm), que es una estimación de la cantidad de percolación del suelo a una profundidad de 1 m, y fue propuesto por el USDA (Williams y Kissel, 1991). El LI se calcula como el producto de un índice de percolación (PI) y un índice estacional (SI):

$$LI = PI \cdot SI \tag{24.3}$$

El Índice de percolación se calcula como:

$$PI = \frac{\left(P - {}^{10160}/_{CN'} + 101.6\right)^2}{P + {}^{15240}/_{CN'} - 152.4} \quad si \quad P - {}^{10160}/_{CN'} + 101.6 > 0 \tag{24.4}$$

donde P es la precipitación anual (mm) y CN' es un número de curva modificado con valores de 28, 21, 17 y 15 para los grupos hidrológicos A, B, C y D, respectivamente (Capítulo 8). Si la condición establecida en la ecuación 24.4 no se cumple entonces PI = 0.

El índice de estacionalidad representa la concentración de las precipitaciones durante la temporada de invierno:

$$SI = \left(\frac{2\,P_w}{P}\right)^{1/3} \tag{24.5}$$

donde P_w es la precipitación total (mm) durante el otoño y el invierno (1 de octubre a 31 de marzo en las latitudes norte y 1 de abril-30 de septiembre en las latitudes S).

El Índice de lixiviación es solamente indicativo de las posibles pérdidas por lixiviación, pero no de las pérdidas reales. Si el LI es alto, un manejo adecuado del suelo y el cultivo puede conducir a una baja lixiviación real. Por el contrario, con bajo LI podemos esperar una baja lixiviación real independientemente del manejo. En otras palabras, las medidas para reducir la concentración de nitrato serán muy efectivas en la reducción de la lixiviación en lugares con alto LI.

Ejemplo 24.4.

Calcular el LI por dos lugares, Adelaida (Australia) y Dublín (Irlanda) para un suelo de clase hidrológica A (CN'= 28) utilizando la precipitación mensual (mm) que se muestra a continuación:

Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Año
Adelaida, Australia	19	20	22	38	57	50	67	51	40	37	23	24	448
Dublín, Irlanda	69	50	54	51	55	56	50	71	66	70	64	76	732

Aplicando la ecuación 24.4 a Adelaida (P = 448 mm, P_w = 303 mm) obtenemos PI = 41.5 mm y SI = 1.1 (Ec. 24.5), de modo que LI = 45.9 mm.

Para Dublín (P = 732 mm, P_w = 383 mm), PI = 197 mm y SI = 1.02 por lo que LI = 200 mm. El riesgo de lixiviación es mucho mayor en Dublin que en Adelaida.

Ahora vamos a ilustrar cómo podemos usar los valores de LI para calcular valores aproximados de lixiviación. Vamos a asumir que el suelo tiene un contenido de agua en capacidad de campo y saturación, θ_{FC}=0.25 m^3m^{-3} y θ_{SAT}=0.45 m^3m^{-3}. También suponemos que durante la percolación el agua en el suelo es el promedio de esos valores, es decir, 0.35 m^3m^{-3}. Podemos comparar las situaciones de contenido bajo y alto de nitrato al inicio de la temporada de invierno (p.ej. 25 frente a 100 kg N/ha en 1 m de profundidad) suponiendo que toda la percolación se produce durante el invierno. La pérdida de N por lixiviación se puede calcular como:

$$N_{lix} = N_{ini}\left[1 - \exp\left(-\frac{LI}{Z\,\theta_{med}}\right)\right] \tag{24.6}$$

donde N_{ini} es el contenido inicial de N (kg N/ha), Z es la profundidad del suelo (mm) y θ_{med} es el contenido medio de agua durante la percolación (0.35 m^3m^{-3} en este caso). Aplicando esta ecuación se deduce que la lixiviación podría estar entre 3 y 12 kg de N/ha en Adelaida y entre 11 y 44 kg/ha de N en Dublín. En este último caso la reducción de la lixiviación mediante la reducción de N del suelo sería de 33 kg de N/ha, mientras que en el primero la reducción sería sólo de 9 kg de N/ha.

BIBLIOGRAFÍA

Brady NC, Weil RR (2008) The nature and properties of soils, 4th edition. Pearson Education Inc, Upper Saddle River, NY, USA

Meisinger JJ, Randall GW (1991) Estimating nitrogen budgets for soil-crop systems. In: Follet RF, Keeney DR, Cruse RM (eds) Managing nitrogen for groundwater quality and farm profitability. Soil Science Society of America, Inc. Madison, WI, USA

Scheppers JS, Raun WR (2008) Nitrogen in agricultural systems. Agronomy monograph no. 49. ASA, CSSA & SSSA. Madison, WI, USA

Williams JR, Kissel DE (1991) Water percolation: an indicator of nitrogen-leaching potential. In: Follet RF, Keeney DR, Cruse RM (eds) Managing nitrogen for groundwater quality and farm profitability. Soil Science Society of America, Inc. Madison, WI, USA p 59-83

Apéndice 24.1. Concentración de N (% sobre materia seca) en diferentes especies cultivadas.

En algunos casos se muestran también los valores máximo y mínimo. También se indica el contenido de materia seca (MS, % sobre peso fresco).

Cereales y pseudocereales		MS%	N min	N max	N típica		MS%	N min	N max	N típica
Cebada 2 carreras	grano	86.5	2.20	2.40	2.30	Paja	90.5	0.58	0.88	0.70
Cebada 6 carreras	grano	88.5	1.50	1.80	1.60	Paja	90	0.58	0.88	0.70
Alforfón	semilla	94.85			2.96					
Maíz	grano	86	1.35	1.75	1.60	Restos	87	0.90	1.10	0.97
Maíz	ensilaje	30	1.10	1.45	1.25					
Mijo africano	grano	90			2.20	Restos	92			0.67
Mijo perla	grano	89.5			2.00	Restos	91.5			0.80
Mijo común	grano	90.5			2.30		92			0.80
Avena	grano	91	1.50	1.80	1.60	Paja	89.5	0.60	0.80	0.70
Quinoa	semilla	94.5			2.43					
Arroz	grano	94			1.33					
Arroz (procesado)	grano	87.5	1.05	1.65	1.40	Paja	90	0.50	0.80	0.70
Centeno	grano	87	2.00	2.40	2.20	Paja	90.5	0.35	0.65	0.50
Sorgo	grano	87.5	1.45	2.00	1.90	Restos	92	0.60	0.80	0.70
Sorgo	ensilaje	26	0.70	1.30	1.00					
Sorgo	verde	20	1.30	1.40	1.37					
Triticale	grano	89	2.20	2.50	2.45	Paja	90	0.60	0.90	0.70
Trigo blando	grano	87.5	1.85	2.30	2.10	Paja	90.5	0.40	0.85	0.65
Trigo (duro)	grano	87.5	2.05	2.70	2.40	Paja	90.5	0.40	0.85	0.65
Cultivos de azúcar, aceite y fibra		**MS%**	**N min**	**N max**	**N típica**		**MS%**	**N min**	**N max**	**N típica**
Ricino	semilla	95			2.70					
Algodón	semilla	91	2.32	2.75	2.53	Residuos	92.5	0.90	1.00	0.98
Lino	semilla	93.5	3.30	4.30	3.80	Paja	93	1.00	1.20	1.06
Adormidera	cápsula	87.5	2.30	3.10	2.60	Paja	90	0.80	1.20	1.00
Colza	semilla	91	3.40	4.30	3.90	Residuos	82.5	0.55	0.90	0.80
Cártamo	semilla	92	2.60	2.80	2.70	Residuos	90			0.60
Remolacha azucarera	raíz con corona	20	1.20	1.40	1.30	Residuos	18	1.80	2.80	2.30
Remolacha azucarera	raíz sin corona	21	0.90	1.10	1.05	Residuos	18	1.80	2.80	2.30
Caña de azúcar	tallo	25			0.13		26			0.41
Girasol (aceite)	semilla	91.5	2.20	3.20	2.95	Residuos	87	0.40	1.10	0.80
Girasol (pipa)	semilla	91.5	2.80	3.60	3.20	Residuos	87	0.40	1.10	0.80

Tabaco Burley	hoja + tallo	75	3.80	4.20	4.00					
Tabaco Flue	hojas	8	2.00	2.30	2.10	tallo	9	0.75	1.00	0.80
Leguminosas		**MS%**	**N min**	**N max**	**N típica**		**MS%**	**N min**	**N max**	**N típica**
Judía (seca)	semilla	89	3.50	4.50	4.00	Paja	89	1.10	1.40	1.20
Caupí	semilla	90	4.00	4.20	4.10	Paja	90			1.25
Garbanzo (desi)	semilla	89.5			3.50	Paja	89.5			0.85
Haba (seca)	semilla	90	3.00	4.90	3.70	Paja	85	0.80	2.50	1.60
Cacahuete	fruto	93	4.10	4.30	4.25	Residuos	90.5	1.50	1.70	1.65
Cacahuete	semillas	92	4.70	4.90	4.85	Residuos	90.5	1.50	1.70	1.65
Lenteja	semilla	89	4.20	4.40	4.30	Paja	91			1.10
Guisante	semilla	90	4.00	4.30	4.20	Paja	88.5	1.20	1.40	1.30
Soja	semilla	87.5	6.10	6.90	6.50	Residuos	89	1.00	1.00	0.85
Por edades		**MS%**	**N min**	**N max**	**N típica**		**MS%**	**N min**	**N max**	**N típica**
Alfalfa (verde, vegetativo) Medicago	biomasa	25.0	3.05	4.05	3.55					
Alfalfa (verde, floración) Medicago	biomasa	25.0	2.10	3.10	2.60					
Alfalfa (heno, vegetativo) Medicago	biomasa	85.0	2.80	3.80	3.30					
Alfalfa (heno, floración) Medicago	biomasa	85.0	2.00	3.00	2.50					
Poa pratensis (heno)	biomasa	89.1			1.60					
Bromus spp. (heno)	biomasa	91.1			1.53					
Phalaris arundinacea (heno)	biomasa	89.0			1.70					
Trifolium hybridum (heno)	biomasa	87.4			2.27					
T. incarnatum (heno)	biomasa	88.3			2.65					
T. pratense (heno)	biomasa	86.1			2.51					
Trifolium repens (heno)	biomasa	90.3			3.09					
Trifolium repens (ladino) (heno)	biomasa	89.2			3.32					
Lolium sp. (heno)	biomasa	90.0			1.51					
Lolium pratense (heno)	biomasa	88.4			1.19					
L. arundinaceum (heno)	biomasa	91.6			2.31					
Poaceae (heno)	biomasa	89.1			1.52					
Poaceae (ensilado)	biomasa	24.9			1.84					

Setaria italica (ensilado)	biomasa	27.6			1.59					
Mijo perla-(ensilado)	biomasa	21.6			1.54					
Avena (heno)	biomasa	89.8			1.37					
Dactylis glomerata (verde)	biomasa	25.9			2.37					
Dactylis glomerata (heno)	biomasa	89.2			1.71					
Centeno (heno)	biomasa	92.6			1.21					
Raigrás perenne-(heno)	biomasa	87.3			1.49					
Melilotus sp. (heno)	biomasa	89.6			2.65					
Phleum pratense (heno)	biomasa	90.5			1.20					
Lotus corniculatus (heno)	biomasa	90.0			2.52					
Nabo	raíz	13.5			3.30					
Veza (verde) en floración	biomasa	25.0	2.60	3.40	3.00					
Veza (heno)	biomasa	87.8			2.60					
Veza (heno) en floración	biomasa	85.0	2.50	3.30	2.90					
Vicia villosa (heno)	biomasa	87.9			3.68					
El pasto de trigo (heno) Poaceae	biomasa	91.6			1.34					
Cultivos hortícolas		**DM%**	**N min**	**N max**	**N típica**		**DM%**	**N min**	**N max**	**N típica**
Alcachofa	fruto	17	2.40	2.60	2.50					
Espárrago (verde)	tallos	8	5.40	5.60	5.50					
Espárrago (blanco)	tallos	7	4.20	4.40	4.30					
Judía (verde)	vainas	30	3.00	3.70	3.30	Paja	89	1.10	1.40	1.20
Remolacha	raíz	12	2.10	2.20	2.15	residuos	12	3.60	3.80	3.70
Brócoli	tallos	45	3.30	3.40	3.35					
Coles de Bruselas		13	4.90	5.10	5.00					
Repollo	cabagge	9	3.00	3.50	3.30	residuos	14	2.60	2.80	2.70
Zanahoria	raíz	12	1.40	1.60	1.50	hojas	dieciséis	2.30	2.40	2.35
Coliflor		9	4.30	4.50	4.40					
Apio	hojas	5	2.30	2.50	2.40					
Achicoria	hojas	6	3.10	3.30	3.20					
Pepino	fruto	4	2.40	2.60	2.50					
Berenjena	fruto	7	2.40	2.60	2.50					
Endivia	hojas	5	4.10	4.20	4.15					

Haba (verde)	frutos	19	4.60	4.80	4.70	Paja	25			2.20
Ajo	cabezas	39	2.50	2.80	2.60					1.50
Puerro	bulbo	17	1.30	1.50	1.40	hojas	20			0.90
Lechuga iceberg	hojas	5	2.40	2.70	2.55					
Lechuga romana	hojas	6	4.00	4.40	4.27					
Melón	Fruto	12	0.80	1.00	0.90					
Melón cantaloupe	Fruto	10	1.40	1.60	1.50					
Cebolla	bulbo	10	1.90	2.50	2.20	hojas	8	3.80	4.10	4.00
Perejil	hojas	10	3.30	3.60	3.50					
Guisante (verde)	frutos	12.5	2.20	3.70	3.00	Paja	25	1.90	2.10	2.00
Guisante (verde)	semillas	21	4.30	4.50	4.40	Paja	25	1.90	2.10	2.00
Pimiento verde	fruto	10.5	2.10	2.40	2.30					
Pimiento rojo	fruto	12.5	1.40	2.00	1.90					
Calabaza	fruto	9	2.50	2.70	2.60					
Rábano	raíz	6	1.50	1.70	1.60					
Espinaca	hojas	9	5.10	5.30	5.20					
Calabacín (inmaduro)	fruto	5.5	2.70	3.84	3.20					
Calabacín (maduro)	fruto	14	0.90	1.00	0.91					
Fresa	fruto	9	1.10	1.60	1.35					
Maíz dulce (seco)	grano	90.5	1.90	2.10	2.00	Restos	91	0.90	1.10	1.05
Maíz dulce (fresco)	grano	35	1.50	1.70	1.60	Restos	23	1.10	1.30	1.20
Tomate	Fruto	6	2.30	3.10	2.60		20			1.80
Frutales, vides y arbustos		**MS%**	**N min**	**N max**	**N típica**		**MS%**	**N min**	**N max**	**N típica**
Sandía	fruto	9	1.00	1.50	1.25					
Almendro	con cáscara	85	3.00	3.60	3.30					
Manzano	fruto	18	0.25	0.45	0.35					
Albaricoque	fruto	14	1.50	1.70	1.65					
Aguacate	fruto	27	1.10	1.30	1.20					
Platanera	fruto	26	0.60	0.70	0.65					
Chirimoyo	fruto	26	0.70	0.90	0,78					
Cerezo	fruto	19	1.00	1.20	1.07					
Palmera datilera	fruto	77	0.35	0.45	0.40					
Higuera	fruto	21	0.50	0.60	0.57					
Vid	fruto	19	0.50	0.60	0.57					
Pomelo	fruto	11	0.70	0.80	0.75					
Avellano	fruto	94.5	2.10	2.30	2.20					
Kiwi	fruto	17			0.80					

Limonero	fruto	13	1.30	1.70	1.50					
Mango	fruto	18			0.50					
Palma de aceite	núcleo	79			1.25					
Olivo	fruto	50	0.20	0.40	0.30	vegetativo	70	1.00	2.00	1.50
Naranjo	fruto	18	1.00	1.40	1.20					
Melocotonero	fruto	12	0.80	1.20	1.00					
Peral	fruto	18	0.30	0.50	0.40					
Caqui	fruto	20			0.55					
Ciruelo	fruto	15	0.80	0.90	0.85					
Granado	fruto	25			0.60					
Membrillero	fruto	16			0.54					
Nogal	fruto	93			0.20					
Raíces, tubérculos y bulbos		**MS%**	**N min**	**N max**	**N típica**		**MS%**	**N min**	**N max**	**N típica**
Mandioca	raíz	68.8			0.42					
Ñame chino	tubérculo	59.3			1.39					
Patata	tubérculo	23.5	1.20	1.90	1.60	residuos	51	2.00	2.40	2.20
Batata	tubérculo	65			0.88					
Ñame blanco	tubérculo	63.1			0.94					
Ñame amarillo	tubérculo	58.3			0.99					

Capítulo 25

La fertilización nitrogenada II: Las necesidades de fertilizantes

M. QUEMADA
A. DELGADO
L. MATEOS
F.J. VILLALOBOS

RESUMEN:

El balance de N permite el cálculo de las necesidades de fertilizante que dependen de la cantidad de N absorbido por el cultivo, del N inorgánico en el suelo o aportado por la mineralización y de las pérdidas de N del sistema, que se cuantifican por la eficiencia de recuperación. Un plan de fertilización debe tener en cuenta la variabilidad de los factores ambientales (ej. lluvia) y de manejo (ej. riego, laboreo) para distribuir el N con flexibilidad y las condiciones específicas de cada año. Si se hace así, vamos a evitar reducciones en el rendimiento debidas a la deficiencia de N y mitigar los impactos ambientales negativos por exceso de aplicación. La fertilización de los árboles debe basarse en el balance de nutrientes (en árboles adultos) o en la tasa de crecimiento esperada en función de la transpiración real.

25.1. CÁLCULO DE LA DOSIS DE FERTILIZANTE CON N UTILIZANDO EL MÉTODO DE N_{min}

Como se ha indicado en el Capítulo 24, la respuesta del cultivo a la fertilización con N es muy dependiente de la cantidad de N disponible (esencialmente N inorgánico), presente en el suelo antes de la fertilización. Por lo tanto, se pueden esperar necesidades de fertilizante de N bajas cuando en el suelo hay una gran cantidad de N disponible. Los métodos de Nmin se basan en la cantidad de nitrógeno mineral presente en el suelo al final del invierno, con la recomendación de disminuir la dosis de N conforme aumenta el N disponible en el suelo. Para poner en práctica este método, es necesario establecer una relación entre la dosis óptima de N para un cultivo y la cantidad de N mineral en el suelo a una profundidad dada al principio del ciclo de cultivo en una zona geográfica determinada con un ambiente similar (suelo y clima) y manejo del cultivo parecido. Para establecer esta relación es necesario llevar a cabo una red de ensayos en diversos lugares, con diferentes niveles de N mineral en el suelo. El modelo ajustado es:

$$N_f = A_f - B_f N_{min} \tag{25.1}$$

donde N_f es la dosis óptima de N (máximo beneficio), el parámetro A_f representa el N total necesario para el cultivo en estas condiciones ambientales y de manejo, y B_f es la cantidad de N proporcionada por el suelo por unidad de N contenido en la profundidad muestreada de suelo. Por lo tanto, este modelo para estimar las dosis de N representa la diferencia entre el N mineral requerido por cultivo y la cantidad efectivamente proporcionada por el suelo.

A veces, el método se ha simplificado mediante la determinación sólo del nitrato del suelo, ya que la mayoría del nitrógeno inorgánico está en forma nítrica al final del invierno, pero se debe tener cuidado ya que el amonio puede ser relevante después de inviernos fríos o en suelos ácidos. Otra simplificación habitual es tomar muestras de suelo para análisis de N inorgánico sólo en la capa superior (30 cm de profundidad) que se utilizan como un indicador del N existente en todo el suelo. Sin embargo, se recomienda tomar las muestras en toda la profundidad de absorción radical. Estos métodos han sido empleados con éxito en Europa (método N_{min}) y también en los EE.UU., donde se lo conoce como "test de nitrato en pre-siembra" (PPNT).

Algunos factores adicionales deben ser tenidos en cuenta cuando se utiliza este método para estimar el requerimiento de fertilizante de N:

- Cultivos de invierno: al final del invierno (antes de aplicar abonados de cobertera) se analiza el suelo para determinar N_{min} y ajustar la dosis de N. Si el crecimiento esperado del cultivo durante el invierno es pequeño, no se recomienda la aplicación de fertilizantes de N en presiembra para evitar las pérdidas de nitratos por lixiviación o desnitrificación. En las zonas cálidas, donde el crecimiento del cultivo y absorción de N son importantes antes de la cobertera, una pequeña fracción de la dosis de fertilizante (15 a 30%) podría aplicarse antes de la siembra.

- Cultivos de primavera: el análisis y la estimación de la dosis se basa en la determinación de Nmin antes de la siembra y el abono se divide en una aplicación de pre-siembra y varias de cobertera durante el ciclo de crecimiento, tal como se hace para la remolacha azucarera en varios países del norte de Europa o para el maíz en el sur de Europa.
- El método sólo es válido para las condiciones ambientales y de manejo para las que se ha calibrado. Los cambios en el manejo, como la adición de enmiendas de estiércol o la incorporación de residuos de cosecha pueden requerir la adaptación de la recomendación.

25.2. CÁLCULO DE LA DOSIS DE FERTILIZANTE CON N UTILIZANDO EL BALANCE DE N

La estimación basada en el balance de masas de nutrientes puede ser la estrategia recomendada para los nutrientes móviles, tales como el N, que no son retenidos de manera eficiente en los suelos y pueden perderse por lixiviación o emisiones gaseosas. Hay que indicar que el enfoque del balance de masas está dirigido a las estimaciones de dosis de N que se realizan antes de sembrar. El incremento en el N inorgánico del suelo, es decir, la diferencia entre el contenido final (N_{end}) e inicial (N_i) de N del suelo, para el ciclo completo de una especie no leguminosa se puede escribir como:

$$N_{end} - N_i = N_f + N_m + N_{irr} + N_{dep} - N_c - N_l - N_d - N_v \quad (25.2)$$

donde N_f, N_m, N_{irr} and N_{dep} son las entradas de N aplicado como fertilizante, mineralizado, aportado con el agua de riego y asociado a la deposición atmosférica, respectivamente. Las salidas son el N absorbido por el cultivo (N_c), el perdido por lixiviación (N_l), perdido por desnitrificación (N_d) y las pérdidas por volatilización de amoniaco (N_v). La ecuación del balance de N se puede simplificar a:

$$N_{end} - N_i = N_f + N_m + N_{other} - (N_{biom} + N_{root}) - N_{loss} \quad (25.3)$$

donde N_{loss} incluye todas las pérdidas de N y N_{other} incluye los insumos de N de menor importancia (riego y deposición). La ecuación muestra ahora los dos componentes de N en el cultivo: el acumulado en la biomasa aérea (N_{biom}) y el acumulado en las raíces (N_{root}).

25.2.1. Absorción de N del cultivo (Nc)

El contenido de N de la biomasa aérea (N_{biom}, kg N/ha) se calcula en función de la producción esperada de biomasa aérea (cosecha y residuos) y de la concentración de N en los componentes de la biomasa:

$$N_{biom} = Y \cdot NC_{yield} + (B - Y)NC_{res} = Y\left(NC_{yield} + \frac{1 - HI}{HI} NC_{res}\right) \quad (25.4)$$

donde Y es el rendimiento (kg/ha), B es la biomasa aérea (kg/ha), HI es el índice de cosecha y NC_{yield} y NC_{res} son las concentraciones de N en el órgano cosechado y los residuos, respectivamente. Para el cálculo del N total acumulado por el cultivo (N_c) tenemos que añadir el N acumulado en las raíces de la siguiente manera:

$$N_c = N_{biom}(1 + f_{NR}) = (N_{yield} + N_{res})(1 + f_{NR}) \quad (25.5)$$

donde f_{NR} es la relación entre N en las raíces y N en la parte aérea, y N_{yield} y N_{res} son las cantidades de N en el producto cosechado y los residuos, respectivamente.

Si se sobreestima la biomasa, lo mismo pasará con el N aplicado y se producirán pérdidas de N. Por otra parte, si se infraestima la biomasa se aplicará una dosis insuficiente y por lo tanto, el N se convertirá en el factor limitante para el rendimiento. Por lo general, el N en raíces supone entre el 5 y 25% del N en la biomasa aérea, por lo que se pueden tomar valores de 15 a 20% para cultivos extensivos y hasta un 25% para cultivos hortícolas.

El rendimiento estimado (también llamado rendimiento objetivo) debe basarse en los rendimientos de ejercicios anteriores con insumos similares a los que el agricultor tiene la intención de utilizar. Si la especie no ha sido cultivada previamente, el rendimiento debe ser estimado sobre la base de los rendimientos en las fincas vecinas, siempre asegurándose de que no ha habido factores limitantes de la producción no relacionados con los de nuestro cultivo. Además, para N es siempre útil conocer los rendimientos máximos y mínimos esperados para establecer así los valores máximos y mínimos de N_c y así decidir la estrategia más adecuada, cuestión de la que hablaremos más adelante.

La concentración de N del cultivo puede determinarse a posteriori mediante el análisis de la biomasa producida. Sin embargo, para diseñar el programa de fertilización es necesario disponer de estimaciones de la concentración de N *a priori*. La Tabla 24.1 y el Apéndice 24.1 muestran las concentraciones de N referidas a materia seca de diferentes especies cultivadas. En los años en que la intención sea aplicar menos N que el necesario o cuando otros factores no son limitantes (año lluvioso o cultivo bajo riego), debemos elegir los valores más bajos de los intervalos mostrados en la Tabla 24.1. En todos los casos hay que señalar que los valores se refieren a la materia seca, por lo que el rendimiento estimado debe corregirse de acuerdo con el contenido de humedad esperado (Tabla 24.1).

25.2.2. Contenido de N en el suelo inicial y final y mineralización de N

El contenido de N inorgánico del suelo inicial puede variar mucho y se han reportado valores de entre 30 y 500 kg N/ha en una profundidad de suelo de 1 m. La estrate-

gia habitual será intentar agotar el N del suelo durante el ciclo de cultivo, es decir, tratar de hacer el N inorgánico final (N_{end}) lo más pequeño posible. El N_{end} también se llama N residual y por debajo de un valor umbral (entre 10 y 70 kg N/ha, dependiendo de la textura del suelo y la profundidad) no puede ser recuperado por el cultivo. Las determinaciones de N inorgánico en el suelo deben incluir tanto NO_3^- como NH_4^+. Sin embargo, la concentración de nitrato es generalmente alta en relación con la de amonio por lo que se puede analizar solamente la concentración de nitrato para determinar N_i.

La mineralización de la materia orgánica del suelo puede ser una importante fuente de N. El N mineralizado durante el ciclo del cultivo es el resultado de la mineralización neta de la materia orgánica estable y de los residuos y las raíces de los cultivos anteriores. Esta contribución es difícil de estimar, por lo que un enfoque común es suponer que el suelo se encuentra en equilibrio y calcular el suministro de N desde el suelo como la adición de N de los residuos y las raíces del cultivo anterior. Los factores de manejo como el laboreo, el riego o la aplicación de estiércol, pueden modificar en gran medida el estado de equilibrio y producir pulsos de mineralización de N que se deben tener en cuenta para computar el suministro de N y evitar problemas de contaminación. A efectos de cálculo podemos agrupar el N inicial y el mineralizado durante la campaña actual en un solo componente (N_{i+m}) que debe ser proporcional a la cantidad de N en los residuos del cultivo anterior (N'_{res} en parte aérea y N'_{root} en raíces):

$$N_{i+m} = k_{im}F_{res}N'_{res} + N'_{root} = k_{im}F_{res}N'_{res} + f_{NR}\left(N'_{yield} + N'_{res}\right) \tag{25.6}$$

donde F_{res} es la fracción de residuos que se dejan en el campo y N'_{yield} y N'_{res} se refieren al N acumulado en el órgano cosechable y los residuos del cultivo anterior, respectivamente. El coeficiente k_{im} tiene un valor máximo de 1, si todos los residuos aéreos son mineralizados sin que haya pérdidas. Se pueden esperar valores más bajos si los residuos no se incorporan mediante laboreo o cuando la concentración de N en los residuos es baja. Proponemos k_{im} = 0.9 para las leguminosas con laboreo, 0.7 para restos de leguminosas que quedan sobre el suelo y para las no leguminosas con laboreo y 0.5 para no leguminosas que no se incorporan. Téngase en cuenta que el N en las raíces se supone que se encuentra totalmente disponible y se puede calcular como una función del N en la biomasa aérea del cultivo anterior.

25.2.3. Cálculo de la dosis de fertilizantes de acuerdo con el balance de N

A partir de las ecuaciones 25.5 y 25.6 podemos deducir la siguiente fórmula para el cálculo de la dosis de fertilizantes de N:

$$N_f = \frac{N_{end} + (1 + f_{NR})\left(N_{yield} + N_{res}\right) - k_{im}F_{res}N'_{res} - f_{NR}\left(N'_{yield} + N'_{res}\right) - N_{other}}{(1 - n)} \tag{25.7}$$

N_{other} es el N total recibido por deposición atmosférica (5-10 kg N/ha, como un valor conservador) y con el agua de riego. El coeficiente n es la fracción de N aplicado que se pierde (lixiviación, volatilización, desnitrificación) y f_{NR} es la relación entre N en las raíces y N en la parte aérea. Este modelo supone que la mayor parte de la oferta de N del suelo (N_m y N_i) y N en el agua de riego y en la deposición atmosférica son absorbidos por los cultivos sin pérdidas.

Hay varias maneras de calcular la eficiencia de la fertilización. La más común, que podemos llamar E_f, es la fracción de N aplicado que finalmente se acumula en la parte aérea del cultivo y es igual a la pendiente de la relación entre la absorción de N y el N aplicado (Capítulo 24, Fig. 24.6). Sin embargo, esta definición no tiene en cuenta el N en las raíces y el hecho de que el N que queda en el suelo al final del ciclo de cultivo puede no perderse durante el periodo de barbecho y por lo tanto estará disponible para el siguiente cultivo en la rotación. Esto explica por qué los valores medidos de E_f están típicamente en el rango de 0.4 a 0.75 y que valores entre 0.5 y 0.7 sean generalmente aceptables. Una segunda definición de eficiencia (E_{fR}) incluiría raíces, por lo que sería la fracción del N aplicado que se acumula en la parte aérea y las raíces del cultivo. En términos matemáticos:

$$E_{fR} = E_f(1 + f_{NR}) = 1 - n \tag{25.8}$$

Tomando f_{NR}= 0.2, esta ecuación implica que el rango normal de E_{fR} es de 0.5 a 0.9. Así que si aspiramos a E_f = 0.6-0.7, se deduce que nuestro objetivo es E_{fR} = 0.7-0.85.

Además de las consideraciones agronómicas en algunos casos tendremos que considerar otras limitaciones ambientales. En varios países, las cantidades y tipos de fertilizantes nitrogenados han sido restringidos por la ley para prevenir la contaminación por nitratos.

El balance de N y otros métodos para estimar las dosis de fertilizante están destinados a lograr un suministro adecuado de N para lograr el rendimiento óptimo, lo que depende de las condiciones ambientales. Sin embargo, dependiendo de la relación entre el coste del fertilizante y el valor del producto cosechado, las dosis previstas pueden ser modificadas. Cuando los precios de los fertilizantes se elevan, el máximo beneficio se obtiene con dosis de fertilizante más bajas que las estimadas para alcanzar el máximo rendimiento. Si las condiciones no son adecuadas para el cultivo, el uso de dosis muy altas de N para conseguir altos rendimientos puede conducir a un aumento de las pérdidas de N o a altas cantidades de N residual al final del ciclo.

Ejemplo 25.1.

Cultivamos cereal como monocultivo en un suelo ácido con la siguiente distribución de rendimientos:

2000-3000 kg/ha en el 40% de los años

3000-4000 kg/ha en el 30% de los años

4000-5000 kg/ha en el 20% de los años

5000-6000 kg/ha en el 10% de los años

El rendimiento promedio es, por tanto, de 3500 kg/ha.

Suponemos que todos los residuos del cultivo anterior se quedan en el campo (F_{res} = 1) y se incorporan con el laboreo. Por lo tanto k_{im} = 0.7.

La concentración de N es de 1.5% en grano y 0.5% en la paja. El índice de cosecha es de 0.5. El contenido de agua del grano es de 10%. Suponemos f_{NR} = 0.2, N_{other} = 5 kg N/ha. Nuestro objetivo es E_{fR} = 0.85 (las pérdidas de desnitrificación y volatilización son muy bajas en suelos ácidos) y asumimos N_{end} = 25 kg N/ha.

¿Cómo podemos modificar la estrategia de fertilización del cereal si introducimos habas (rendimiento seco de 1500 kg/ha, HI = 0.3) en la rotación?

a) Para cada intervalo de rendimiento (tomando el punto medio) se calcula el requerimiento de fertilizantes nitrogenados. Por ejemplo para el rendimiento de 2500 kg/ha:

N_c (N absorbido):

Rendimiento (material seca)= 2500 (1-0.1) = 2250 kg/ha

Residuos = Y ·(1-HI)/HI = 2250 kg/ha

N_{yield} = Y ·NC_y = 2250 · 0.015 = 33.75 kg N/ha

N_{res}= 2250 · 0.005 = 11.25 kg N/ha

Asumimos que el cultivo anterior tuvo el rendimiento medio (3500 kg/ha)

Rendimiento (material seca)= 3500 (1-0.1) = 3150 kg/ha

Residuos = Y ·(1-HI)/HI = 3150 kg/ha

N'_{yield} = Y' ·NC_y = 3150 · 0.015 = 47.25 kg N/ha

N'_{res}= 3150 · 0.005 = 15.75 kg N/ha

$$N_f = \frac{25 + (1 + 0.2)(33.75 + 11.25) - 0.7 \cdot 1 \cdot 15.75 - 0.2\,(47.25 + 15.75) - 5}{0.85}$$
$$= 59\ kg\ N/ha$$

Para los otros valores de rendimiento tendremos:

Para Y= 3500 kg/ha: N_f=85kg N/ha

Para Y= 4500 kg/ha: N_f=110kg N/ha

Para Y= 5500 kg/ha: N_f=135.5 kg N/ha

b) Estrategias posibles:

- Aplicar 59 kg N/ha cada año. El cultivo siempre estaría limitado por N y se obtendría un rendimiento promedio de 2500 kg/ha por lo que el promedio de N exportado sería 2500 x 0.015 = 37.5 kg de N/ha. El cociente N exportado/N aplicado sería de 0.64.

- Aplicar 85 kg N/ha cada año. En el mejor caso el rendimiento sería de 3500 kg/ha. El rendimiento promedio es entonces:

  $0.4 \cdot 2500 + 0.6 \cdot 3500 = 3100$ kg/ha

  Por lo que el promedio de N exportado sería de 46.5 kg N/ha y la relación N exportado/N aplicado sería de 0.55.

- Aplicar 110 kg N/ha cada año. El rendimiento promedio es entonces:

  $0.4 \cdot 2500 + 0.3 \cdot 3500 + 0.3 \cdot 4500 = 3400$ kg/ha

  Así, el promedio de N sería 51 kg N/ha y la relación N exportado/N aplicado sería 0.46.

- Aplicar 135.5 kg de N/ha cada año. El rendimiento promedio es entonces:

$0.4 \cdot 2500 + 0.3 \cdot 3500 + 0.2 \cdot 4500 + 0.1 \cdot 5500 = 3500$ kg/ha

El promedio de N exportado sería de 52.5 kg N/ha y la relación N exportado/N aplicado sería 0.39.

La mejor estrategia dependerá del precio del grano y del coste de los fertilizantes. En cualquier caso, siempre es mejor seguir una estrategia flexible, es decir, una aplicación en presiembra inferior a 59 kg/ha de N y luego aplicar una cobertera unos meses más tarde (final ahijado). Esta última puede omitirse si el año es malo, y estaría entre 26 y 76 kg N/ha, dependiendo de las condiciones reales del año. Siguiendo una estrategia flexible, si podemos ajustar exactamente las necesidades de N a cada año, aplicaríamos una cantidad media de N:

$0.4 \cdot 59 + 0.3 \cdot 85 + 0.2 \cdot 110 + 0.1 \cdot 135.5 = 84.7$ kg N/ha

Mientras que el promedio de N exportado sería $3500 \cdot 0.015 = 52.5$ kg/ha N y la relación N exportado/N aplicado sería 0.62.

c) Tras un cultivo de habas, el N disponible al sembrar el cereal aumentará. Una medida del N en el suelo antes de la siembra permitiría la cuantificación de este suplemento de N. Si la medición no es posible, podemos calcular el requerimiento de fertilizantes después del cultivo de habas. Primero calculamos el N en la parte cosechada y los residuos de las habas:

$N'_{yield} = Y\ NC_y = 1500 \cdot 0.037 = 55.5$ kg N/ha

$N'_{res} = Y \cdot (1\text{-}HI)/HI \cdot NC_r = 1500 \cdot 0.7/0.3 \cdot 0.016 = 56$ kg N/ha

Para el año de rendimiento más bajo (2500 kg/ha), la dosis de N para trigo después de habas sería:

$$N_f = \frac{25 + (1 + 0.2)(33.75 + 11.25) - 0.9 \cdot 1 \cdot 56 - 0.2\,(55.5 + 56) - 5}{0.85} = 1.5\ kg\ N/ha$$

Que es casi cero, es decir, no habría que aplicar fertilizante. La cantidad de N a aplicar para las otras clases de rendimiento sería de 27, 52 y 78 kg N/ha. Por lo tanto, la aplicación de N en presiembra para trigo podría ser suprimida y se aplicaría una cobertera de entre 27 y 78 kg N/ha unos meses más tarde.

El ahorro de fertilizante proporcionado por la introducción del haba se añaden a otras ventajas agronómicas de una rotación de cultivos. Los ingresos por las habas probablemente serán más bajos que el de los cereales, pero la introducción del cultivo de leguminosas cada dos o tres años puede aumentar la sostenibilidad de los sistemas de cultivo en el medio plazo.

25.3. MÉTODOS PARA MEJORAR EL MANEJO DEL N DURANTE LA CAMPAÑA

La bien conocida variabilidad espacial y temporal de los procesos que afectan al N del suelo representa una limitación relevante en la exactitud de los enfoques basados en el balance de N, que es una estimación antes de la siembra del N necesario para todo el ciclo de cultivo. Para superar esta limitación, se han propuesto estrategias de seguimiento durante la campaña basados en la mejora de las herramientas y tecnologías para mejorar la estimación de necesidades de N. Estas estrategias miden el estado del N del suelo o del cultivo durante la campaña para evaluar la necesidad de N adicional o recomendar dosis específicas de N suplementario. Por lo general, estas estrategias implican múltiples aplicaciones de N y permiten decidir el cambio de las dosis de fertilizantes en función de las mediciones reales de N en el suelo o en el cultivo. Por lo tanto, estos métodos implican una estrategia dinámica capaz de adaptarse a las condiciones ambientales durante la campaña.

El método más clásico es el test de nitratos en pre-cobertera (PSNT), empleado para el maíz en los EE.UU. Es un método del tipo N_{min} basado en un análisis de nitratos del suelo (30 cm de profundidad) cuando las plantas tienen 20-30 cm de altura. Representa una evaluación puntual de la acumulación de nitrato en el suelo en primavera, antes de que el cultivo inicie la fase de crecimiento rápido. El método PSNT tiene en cuenta el N residual que queda de los cultivos anteriores, la mineralización de N y las pérdidas de N antes de la fecha de la toma de muestras, justo antes de que el cultivo requiera grandes cantidades de N.

Además de los métodos basados en N disponible en el suelo, ha habido un desarrollo importante de sensores para determinar el estado nutricional de los cultivos para ajustar las dosis de fertilización durante el ciclo. Los sensores se basan en la determinación de la transmitancia o reflectancia de una hoja o del dosel en diferentes longitudes de onda y pueden ser manuales o transportados por un tractor. Si otros factores del crecimiento son conocidos, las lecturas pueden relacionarse con la actividad de la clorofila y, por tanto, con el estado nutricional del cultivo. Comparando con una zona bien fertilizada se puede calcular un índice de suficiencia (relación de

lecturas para el cultivo y la zona bien fertilizada) que se puede utilizar para aplicar dosis variables en la parcela.

25.4. LA FERTILIZACIÓN DE ÁRBOLES FRUTALES

25.4.1. Arboles adultos

Los árboles adultos son muy eficientes en la translocación de N a las reservas (por ejemplo, antes de la caída de hojas en especies caducifolias) que será posteriormente puesto a disposición para un nuevo crecimiento. Por lo tanto en plantaciones de árboles adultos el cálculo de N en el cultivo sólo debe considerar las cantidades de N exportado con el producto cosechado, o que se pierde por la poda y la caída de la hoja:

$$N_c = Y\,NC_{fruto} + B_{poda}\,NC_{shoots} + B_{hoja}\,NC_{senesced} \tag{25.9}$$

Los valores de concentración de N en frutos se presentan en la Tabla 24.1 (y Apéndice 24.1). Las concentraciones de ramos y hojas senescentes pueden tomarse como 1%. La cantidad de hoja caída (B_{hoja}) será igual a la biomasa total de hojas de árboles de hoja caduca y alrededor del 50% de la biomasa de hojas de árboles de hoja perenne con una vida útil de la hoja de 2 años. Téngase en cuenta que se trata de una estimación conservadora de la absorción de N por el cultivo ya que el N en los residuos de poda solamente se pierde cuando éstos se queman. La producción total de biomasa vegetativa durante la estación de crecimiento (B_v) es la suma de la biomasa de poda, la de hojas senescentes y el crecimiento de estructuras permanentes (tronco, ramas principales). Por tanto, utilizando la definición de índice de cosecha, se puede escribir:

$$B_{poda} + B_{hoja} = \beta_{pl}\,\frac{1 - HI}{HI}\,Y \tag{25.10}$$

donde β_{pl} es la fracción de B_v que no se usa en estructuras permanentes. Este parámetro es muy alto (0.8-0.9) para la mayoría de las especies de hoja caduca y para las de hoja perenne con manejo intensivo. Por lo tanto, ahora podemos simplificar la ecuación 25.6 a:

$$N_c = Y\left[NC_{fruto} + \beta_{pl}\,\frac{1 - HI}{HI}\,NC_{pl}\right] \tag{25.11}$$

donde $NC_{N\,pl}$ es la concentración media de N en los residuos y en las hojas senescentes, que puede ser tomado como 1%. Los datos sobre HI de frutales indican que por lo general es superior a 0.5, por lo que si no hay información disponible para una especie dada se puede tomar un valor de 0.6.

Para calcular la cantidad de fertilizante a aplicar debemos tener en cuenta el destino de los restos de poda. Si se queman o se exportan sólo la hoja caída permanece en el suelo y aportará N mineral después de su mineralización algún tiempo después. En el mejor de los casos, con cero pérdidas de N del sistema, podríamos recuperar todo el N de las hojas caídas. Por lo tanto, la cantidad mínima de fertilizante a aplicar si los residuos se queman o se exportan será:

$$N_f = \frac{1}{E_{fR}}\left[N_c - 0.5\, Y\, \beta_{pl} \frac{1-HI}{HI} NC_{pl}\right] = \frac{Y}{E_f}\left[NC_{fruto} + 0.5\, \beta_{pl} \frac{1-HI}{HI} NC_{pl}\right] \quad (25.12)$$

Si los residuos se incorporan en su totalidad entonces la cantidad mínima a aportar se reduce a $Y\, NC_{fruit}/E_{fR}$.

Ejemplo 25.1.

Un viñedo de regadío rinde 25 t/ha de uva de mesa. El contenido de agua es 80% (Tabla 24.1), de modo que el rendimiento de materia seca es 5 t/ha. La concentración de N en frutos es 0.6% (sobre materia seca). Ahora, usando la Ec. 25.11:

$$N_c = 5000\left[0.006 + 0.9\, \frac{0.4}{0.6}\, 0.01\right] = 60\, kg \frac{N}{ha}$$

Suponiendo $E_f = 0.8$, si los residuos de poda se incorporan, la cantidad mínima de fertilizante sería 37.5 kg N/ha. Si se exportan los residuos debemos aplicar al menos 56 kg N/ha. En cualquier caso, la cantidad de fertilizante no debe exceder de 60/0.8 = 75 kg N/ha. Una cubierta herbácea (por ejemplo, leguminosas o mezcla leguminosas/gramínea) podría abastecer una buena parte del N requerido por el viñedo. Una fracción del N contenido en los residuos estaría disponible para el viñedo durante la temporada de crecimiento después de segar la cubierta (50%) o incorporarla al suelo (70%).

25.4.2. Arboles en crecimiento

Para plantaciones jóvenes también tenemos que incluir la demanda de crecimiento vegetativo, que depende de la edad, de la especie y de las condiciones ambientales. No es fácil calcular el aumento en biomasa de los árboles jóvenes. Para algunas especies se han establecido relaciones empíricas entre la biomasa y el diámetro del tronco del árbol. Un enfoque más general y sencillo es relacionar el crecimiento del árbol con la transpiración mediante la eficiencia en el uso del agua, extendiendo la ec. 14.8 (Capítulo 14) a toda la estación de crecimiento:

$$\Delta B = \sum_{0}^{T} E_{p\ tree} \frac{\alpha_w}{VPD} \quad (25.13)$$

donde T es la duración del crecimiento, mientras que la transpiración es proporcional a la ET_0, a la relación de radiación interceptada (RR_i) y al coeficiente de transpiración para cobertura completa (K_{tf}) (ver ec. 9.28). Por lo tanto:

$$\Delta B = \sum_{0}^{T} \frac{\alpha_w}{VPD} ET_0 RR_i K_{tf} \tag{25.14}$$

Finalmente se calcula la absorción de N (N_c, g N/árbol) requerido para ese aumento en la biomasa suponiendo una alta concentración de N (2%) que es un límite superior para la biomasa de árboles jóvenes:

$$N_c = 0.02 \sum_{0}^{T} \frac{\alpha_w}{VPD} ET_0 RR_i K_{tf} \tag{25.15}$$

Para árboles jóvenes la cantidad de fertilizante a aplicar debe coincidir con la absorción esperada, usando un valor apropiado de la eficiencia.

Ejemplo 25.1.

En el ejemplo 3.5 se calculó la relación de interceptación de un olivo con un radio de 0.5 m en Córdoba, España, el 21 de marzo como $RR_i = 0.69$ m². Si ET_0 es 3 mm/día, tomando un valor de $\alpha_w = 7.5$ g L^{-1} kPa (Capítulo 14) y $K_{tf} = 1$, con VPD = 1.5 kPa:

$$N_c = 0.02 \sum_{0}^{T} \frac{\alpha_w}{VPD} ET_0 RR_i K_{tf} = 0.02 \frac{6.5}{1.5} 3 \cdot 0.69 \cdot 1 = 0.18\, g \frac{N}{árbol}$$

Suponiendo $E_f = 0.8$, la cantidad de fertilizante nitrogenado debería ser 0.18/0.8 = 0.23 g N/día/árbol.

Un enfoque similar al de la fertilización de árboles jóvenes con N puede ser empleado para P y K mediante la aplicación de las concentraciones adecuadas. Para árboles de hoja caduca podemos usar 0.2% de P y 0.9% de K. Para árboles de hoja perenne, los valores son 0.12% de P y 0.9% de K.

BIBLIOGRAFÍA

Brady NC, Weil RR (2008) The nature and properties of soils (4th ed) Pearson Education Inc, Upper Saddle River, NY, USA

Scheppers JS, Raun WR (2008) Nitrogen in agricultural systems. Agronomy monograph no. 49. ASA, CSSA & SSSA. Madison, WI, USA

Capítulo 26

La fertilización con fósforo, potasio y otros nutrientes

A. DELGADO
M. QUEMADA
F.J. VILLALOBOS
L. MATEOS

RESUMEN:

El fósforo y el potasio son nutrientes importantes cuyo manejo tiene algunas características comunes, ya que ambos son no móviles en el suelo. La mayor parte del P y el K en el suelo no está disponible para las plantas. Las reacciones implicadas en su ciclo en el suelo dan lugar a que sólo una parte de los nutrientes aplicados permanezcan disponibles para las plantas (retrogradación). El manejo adecuado de fertilizantes debe estar orientado a la recuperación máxima del P y el K aplicados, lo que significa que la retrogradación no se vea favorecida. Con este fin deben tenerse en cuenta alternativas a la aplicación en presiembra sobre toda la superficie, tales como las aplicaciones localizadas o en bandas o el fertirriego. Dado que ambos nutrientes no son móviles en el suelo el riesgo de lixiviación es muy bajo. Por lo tanto, las estrategias de manejo para ambos nutrientes se pueden diseñar a medio y largo plazo. Esto contrasta con el N, cuyas estrategias de manejo son establecidas para cada cultivo a corto plazo. El logro de alta eficiencia en la fertilización con P y K está ganando interés, ya que ambos nutrientes se consideran recursos no renovables. Un ejemplo de lo que podría suceder con el agotamiento progresivo de las reservas fue la "crisis del P" en 2008, cuando el precio de la roca fosfatada se multiplicó por tres debido a la reducción de las exportaciones de China.

Otros nutrientes se aplican por lo general cuando se espera que haya deficiencia (estrategia de suficiencia). Se pueden esperar deficiencias de Ca y Mg en suelos ácidos. Las deficiencias de Mg pueden ser también causadas por la alta saturación de Ca en el complejo de cambio o por fertilización excesiva con K. La disponibilidad de micronutrientes puede estar limitada por las cantidades en el suelo, y también por las propiedades del suelo que afectan el funcionamiento de la raíz en términos de adquisición y absorción de estos nutrientes.

26.1. INTRODUCCIÓN: EL FÓSFORO Y EL POTASIO COMO NUTRIENTES ESENCIALES

El fósforo y el potasio son los dos nutrientes principales que se consideran no móviles en el suelo (véase el Capítulo 2). Ambos nutrientes aplicados como fertilizante se fijan rápidamente en el suelo a través de diferentes procesos. Esto significa que, en contraste con el N, el riesgo de lixiviación no es significativo en la mayoría de los suelos, excepto en aquellos con muy baja capacidad de adsorción (por ejemplo, suelos muy arenosos). Por otra parte, las reacciones de fijación en los suelos implican que sólo una fracción del fertilizante aplicado quede disponible para las plantas. Al igual que con el N, el manejo de fertilizantes de P y K debe centrarse en lograr la máxima eficiencia en el uso de los nutrientes aplicados. Con este fin, para el N es muy importante reducir el riesgo de pérdidas, principalmente a través de lixiviación; en el caso de P y K, el manejo de fertilizantes debe centrarse en reducir al mínimo la fracción de nutriente aplicado que queda fijada finalmente en el suelo como formas no disponibles.

Bajo un suministro no limitado de N en los sistemas terrestres y acuáticos, el P suele ser el nutriente limitante para el crecimiento de las plantas. El fósforo está involucrado en muchos procesos biológicos, incluyendo funciones estructurales relevantes como parte de los ácidos nucleicos o fosfolípidos de las membranas. También tiene un papel clave en las reacciones metabólicas, en particular las que participan en la transferencia de energía (reacciones de fosforilación). Las plantas absorben el fósforo de manera activa y sólo en las formas $H_2PO_4^-$ y HPO_4^{2-} , presentando la segunda una tasa de absorción mucho más lenta.

La deficiencia de fósforo tiene un impacto significativo en el crecimiento del cultivo. Dada la alta movilidad del P dentro de la planta, los síntomas de deficiencia se detectan por primera vez en las hojas menos jóvenes que envejecen prematuramente. En las plantas deficientes en P, es usual observar un color púrpura en las hojas debido a la acumulación de pigmentos antociánicos. Las concentraciones normales de P en hojas varían en gran medida entre especies en el intervalo de 0.05 hasta 0.3 % (sobre materia seca) (Tabla 26.1).

Tabla 26.1. Concentración crítica y rango de suficiencia para P, K, Ca y Mg en hojas o tallos de especies cultivadas.

		Concentración de nutrientes (% sobre peso seco)					
		P		K		Ca	Mg
Cultivo	Crítica	Adecuado	Crítica	Adecuado	Crítica	Adecuado	Adecuado
Algodón	45 DDS		> 0.4		> 3.2		0.65-0.8
Haba	Floración	0.19-.24	0.3-.55	1.8-2	2.2-4	0.6-1.2	0.24-0.5
Lino*	53 DDS		0.37- 0.69		2.5-3.5	0.96-1.7	0.36-0.65
Avena	Ahijado	0.24-0.29	0.3-0.5	4.3-4.9	5-5.7	0.21-0.4	0.13-0.3
Arroz*	Ahijado		0.37-0.55	1.6	1.6-3	0.1-0.30	0.14-0.21

		Concentración de nutrientes (% sobre peso seco)					
		P		K		Ca	Mg
Cultivo	Crítica	Adecuado	Crítica	Adecuado	Crítica	Adecuado	Adecuado
Remolacha azucarera	50-80 DDS	<0.45	0.45-1.1	2	2.0-6.0	0.5-1.5	0.25-1
Trigo	Ahijado	<0.35	0.35- 0.49	<2.3	2.4-4	0.21-0.4	0.13-0.3
Manzano	Verano	0.10-0.14	0.15-0.2	0.8-1.1	1.2-1.5	1.1-2.0	0.21-0.25
Albaricoque	Verano	0.09-.13	0.14-0.25	1.0-1.9	2.0-3.5	2.0-4.0	0.30-0.85
Cítricos	General	0.09-0.11	0.12-0.16	0.4-0.69	0.7-1.5	3.0-6.0	0.26-0.60
Olivo	Verano		0.1-0.3	0.4-0.8	> 0.8	> 1.0	> 0.1
Melocotonero	Verano	0.09-.13	0.14-0.25	1.0-1.9	2.0-3.0	1.8-2.7	0.30-0.80
Peral	Verano	0.10-0.13	0.14-0.20	0.7-1.1	1.2-2.0	1.5-2.2	0.3-0.5

*Parte áerea. DDS: Días desde siembra

La altas dosis de fertilizantes de P pueden dar lugar a un enriquecimiento del suelo en este nutriente. Esto puede tener consecuencias adversas para los cultivos, como el aumento del riesgo de deficiencias de Zn y Fe. También puede afectar negativamente a los ecosistemas vecinos. Así, el enriquecimiento excesivo de P de los suelos agrícolas puede promover una pérdida elevada de este nutriente hacia las masas de agua asociada a las partículas del suelo erosionadas. Una alta concentración de P en el agua superficial dispara el crecimiento de algas y malas hierbas acuáticas lo que da lugar a su eutrofización. Por lo tanto, la erosión puede tener un gran efecto sobre las pérdidas de P del suelo y sobre la contaminación de las aguas superficiales por el sedimento transportado.

El potasio se absorbe activamente como un ión. La absorción se controla por la concentración interna. Una vez absorbido se transporta principalmente a los tejidos jóvenes en crecimiento. El potasio tiene un papel como osmoregulator y está implicado en el control estomático. Además indirectamente promueve la fotosíntesis y el transporte de asimilados, y tiene una acción directa sobre la actividad de algunas enzimas importantes. El potasio también está implicado en la tolerancia de las plantas al estrés por frío o por falta de agua.

Los síntomas de deficiencia de potasio no son claros y cuando aparecen, el cultivo puede haber sufrido ya un efecto negativo. Al ser móvil, los síntomas de deficiencia aparecen primero en las hojas más viejas. La Tabla 26.1 proporciona una guía sobre las concentraciones habituales y el umbral de K en las hojas de diferentes cultivos.

El fósforo y el potasio son considerados como recursos no renovables debido a que la producción de sus fertilizantes se abastece en última instancia de la minería. Esto contrasta con el caso del N porque la atmósfera es una fuente casi inagotable para la producción de fertilizantes. Las reservas de fósforo y de potasio son finitas y su

demanda aumentará en las próximas décadas debido a la necesidad de aumentar la producción agrícola para satisfacer las necesidades de una población creciente en el mundo. Bajo esta perspectiva, se espera que los precios de los fertilizantes de P y de K aumenten drásticamente en el futuro próximo. Además el P puede ser considerado como un recurso estratégico ya que la mayoría de las reservas conocidas se encuentran sólo en tres países (EE.UU., Marruecos y China). Por lo tanto, el manejo racional de P y K es un requisito básico para garantizar la sostenibilidad de la producción agrícola durante las próximas décadas.

26.2. EL P EN EL SUELO

El fósforo no es un elemento abundante en el suelo, ya que no forma parte de los minerales del suelo más comunes, siendo su concentración total en el suelo por lo general menor de 1 g/kg. Se encuentra principalmente en forma de fosfato, que se puede encontrar en formas orgánicas (ésteres básicamente) o minerales. Ambos tipos de compuestos pueden estar en la disolución del suelo o unidos a la fracción sólida. Como se indicó anteriormente, el fosfato inorgánico (formas disociadas del ácido ortofosfórico) es la forma en la que las plantas toman el P; en la disolución del suelo se encuentra en un equilibrio más o menos reversible con formas específicamente adsorbidas (ver 2.4.3) a superficies hidroxiladas (óxidos de Fe y Al y, en menor medida, bordes de los minerales de arcilla y carbonatos) y con fosfatos metálicos precipitados (principalmente fosfatos de Fe, Al, y Ca, dependiendo del pH del suelo). Los fosfatos metálicos termodinámicamente estables, tales como el apatito en suelos con un pH alto y una alta saturación de Ca, son insolubles; por tanto, contribuyen poco al P en la disolución del suelo. Otros precipitados menos estables pueden estar presentes en menor medida y pueden contribuir más al P en disolución (Fig. 26.1). La precipitación en forma de fosfatos metálicos insolubles y las reacciones de adsorción explican que sólo una fracción del P aplicado como fertilizante siga disponible para las plantas. Las formas orgánicas son principalmente mono- y

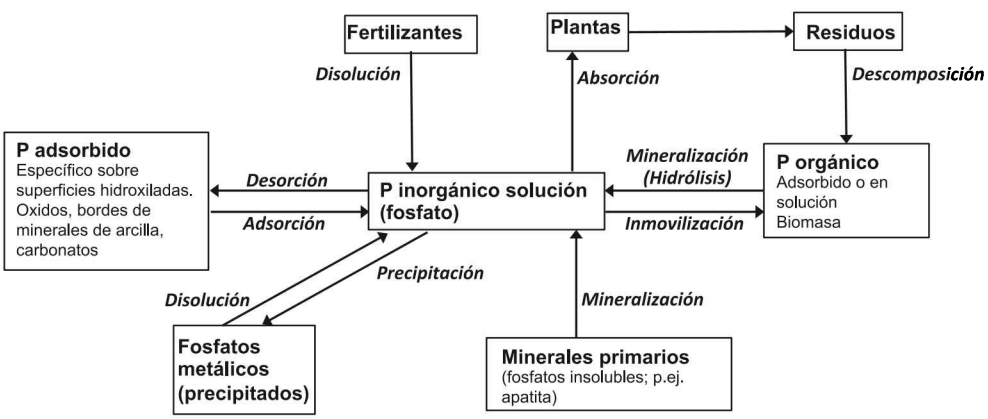


Figura 26.1. Ciclo del P en el suelo. En cursiva: procesos físicos, químicos o biológicos implicados en el ciclo de nutrientes.

diésteres-fosfato. Estas formas también pueden ser adsorbidas, a veces con más fuerza que el fosfato inorgánico, y pueden precipitar también. Como en el caso del N y otros elementos, el fósforo puede ser utilizado por los microorganismos del suelo y por tanto, inmovilizado, al menos temporalmente. El proceso inverso, la mineralización, requiere la hidrólisis de enlaces éster que es catalizada por diferentes tipos de fosfatasas, que pueden ser producidas por raíces de las plantas y algunos microorganismos del suelo. El P orgánico puede constituir una fracción significativa (tipicamente entre el 25 y el 75%) del P total en el suelo, incluso en suelos mediterráneos con baja concentración de materia orgánica.

La concentración de fósforo en la disolución del suelo es generalmente muy baja, típicamente menos de 1 mg/L en los suelos agrícolas. A medida que las plantas lo absorben, hay una reposición a partir de las formas adsorbidas o precipitadas. La relación entre P adsorbido y P en la disolución del suelo viene determinada por el poder tampón para el P del suelo, que depende, entre otros factores, de su capacidad de adsorción de P (Fig. 26.2). Un alto poder tampón indica una buena capacidad del suelo para reponer el P de la solución conforme lo absorbe el cultivo. Si el poder tampón es bajo, la concentración de P en la disolución puede ser alta, pero la capacidad del suelo para mantener la concentración en disolución a medida que el cultivo absorbe es limitada. Por otro lado, el P suministrado como fertilizante pasa inicialmente a la solución del suelo, pero se desplazará a formas fijadas a partículas sólidas tanto más cuanto mayor sea el poder tampón. Esto significa que para la restauración de una deficiencia de P en la solución necesitamos proporcionar dosis de fertilizante tanto más altas cuanto mayor sea el poder tampón del suelo.

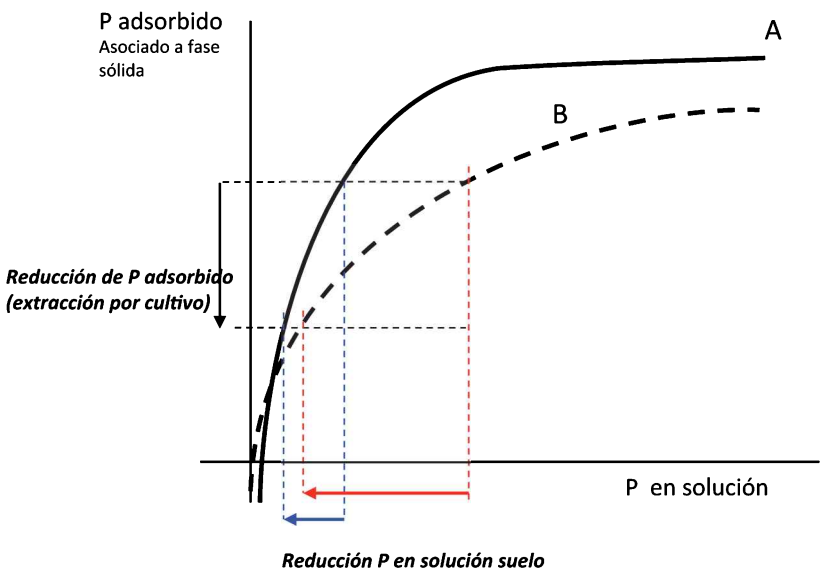


Figura 26.2. Consecuencias del poder tampón para el P en los suelos. A: suelo con alta capacidad tampón; B (línea de puntos): suelo con baja capacidad tampón. La flecha roja representa la disminución de la concentración de P en la solución de suelo en B, y la flecha azul la disminución en el suelo A para la misma disminución en P adsorbido.

El grado de ionización de los fosfatos depende del pH del suelo (Fig. 26.3). En los suelos ácidos predominan los iones monovalentes mientras que en suelo neutro la relación entre las formas monovalentes y divalentes es de aproximadamente 1:1. Las plantas absorben solamente $H_2PO_4^-$ and HPO_4^{2-}, y la segunda mucho más lentamente. Por lo tanto, la absorción de P es más rápida en los suelos ácidos. Las plantas pueden secretar ácidos orgánicos a la rizosfera que liberan P adsorbido y disuelven el P precipitado, y fosfatasas que contribuyen a mineralizar el P orgánico. Además de esto, la interacción entre raíces de las plantas y los microorganismos en la rizosfera es muy relevante en la captación de P por las plantas debido a que los microorganismos pueden liberar ácidos orgánicos y fosfatasas. Las micorrizas simbióticas también pueden contribuir a la absorción de P por las plantas aumentando la superficie de absorción de P por las raíces.

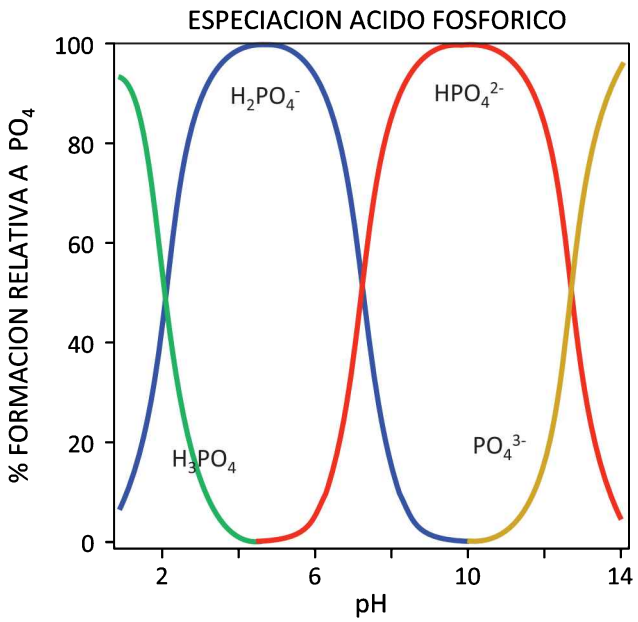


Figura 26.3. Especiación del ácido fosfórico

26.2.1. El P disponible para las plantas en el suelo: el test de P del suelo

El fósforo lábil en el suelo es el que se encuentra en la fase sólida y puede pasar fácilmente a la disolución del suelo. En general se acepta que el fósforo disponible es la suma de P en la solución del suelo y P en formas lábiles (ver 2.6). El P disponible en un suelo por lo general representa una pequeña fracción del P total (con frecuencia menos del 10%). La determinación precisa del P disponible sólo puede hacerse por métodos biológicos que miden la cantidad extraída por cultivos sucesivos hasta que aparece una deficiencia evidente del nutriente en las plantas (ensayos de ago-

tamiento de P). Esto no es práctico para la estimación de las necesidades de fertilizantes. Sin embargo, hay métodos químicos o biológicos que dan resultados que se relacionan estrechamente con los obtenidos en los ensayos de agotamiento. Estos métodos pueden ser considerados como índices de disponibilidad de P o tests de P en el suelo, siendo los más habituales los que implican extracción química del P del suelo (Tabla 26.2).

Tabla 26.2. Diferentes tests de disponibilidad de P del suelo. * Multiplicar por 1.5-2 para cultivos de alto rendimiento

Método	Extractante	Condiciones para su empleo	Países	Condiciones específicas	Nivel umbral mg P/kg
Olsen	0,5 M $NaHCO_3$ pH 8.5	suelos ligeramente ácidos a básicos	Reino Unido, parte de EE.UU., países mediterráneos de la UE	Cultivos de secano en zonas semiáridas en suelos arcillosos	4-12 (media de 8)
				Cultivos de secano en áreas mediterráneas	8-10
				Cultivos de secano en áreas húmedas y suelos de textura media	4-5
				Cereales de primavera en zonas húmedas en suelos de textura media (rendimiento moderado)	8-10
				Los cereales de invierno en zonas húmedas en suelos de textura media (alto rendimiento)	15-20
				Remolacha azucarera	15-20
				Maíz y trigo en suelos franco-arenosos (China)	8-16
				Suelos arcillosos recomendación general (*)	8-10
				Suelos francos recomendación general (*)	10-12
				Suelos arenosos recomendación general (*)	12-20
Mechlich I	HCl 0.05 M + 0.0125 M H_2SO_4	Extracción multinutriente en suelos con baja CEC	parte de EE.UU.	General	25

Mechlich III	0.2 M CH_3COOH + 0.25 M NH_4NO_3 + 0.015 NH_4F + 0.013 M HNO_3 + 0.001 M EDTA – pH 2.5	Extracción multinutriente para una amplia gama de suelos; bien correlacionada con Bray I, Mechlich I y Olsen	parte de EE.UU.	General	50
Bray I (Bray-Kurtz)	0.03 N NH_4F + 0.025 N HCl	Suelos con pH ácido y neutro	Suelos ácidos en algunos países (por ejemplo, EE.UU.)	General	30
Bray II	0.03 N NH_4F + 0.01 N HCl	Suelos con pH ácido y neutro		General	10-20
Egner et al.	0.1 M lactato amónico + 0.2 M acético, pH 3.75	Extracción multinutriente	Europa del Este y Central, Portugal Escandinavia	General	70-180
Egner -Riehm	0.01 M Ca lactato+ 0.02 M HCl	Extracción multinutriente	Alemania	General	100
Morgan	0.7 M $NaC_2H_3O_2$ + 0.54 M CH_3COOH – PH 4.8.	Extracción multinutriente en suelos ácidos con baja CEC		General	4-6
Morgan modificado	0.62 M NH_4OH + 1.25 M CH_3COOH – PH 4.8..	Extracción multinutriente en suelos ácidos con baja CEC		General	4-6
Soltanpour (AB-DTPA)	1 M NH_4HCO_3 + 0.005 M DTPA – pH 7.5	Extracción multinutriente de P, cationes y micronutrientes; principalmente para suelos calcáreos		General	10 (similar al Olsen)
Dyer-Demolon	Acido cítrico al 2%	Suelos ácidos		General	90-180
Schüller	0.05 N Ca lactato + 0.05 M Ca acetato + 0.3 M acético	Suelos ácidos		General	80-140
Truog	0,2 N H_2SO_4	Suelos no calcáreos		General	20

El test de P no es una medida real de la cantidad de P disponible, pero puede proporcionar información sobre si la reserva disponible en el suelo es suficiente para cubrir las necesidades del cultivo. Los tests de P del suelo son cruciales para el manejo de fertilizantes con P, pero para su uso práctico, hay que determinar los *valores críticos o valores umbral* para cada test de P del suelo. El valor crítico es el valor por encima del cual no hay respuesta en el rendimiento del cultivo a la aplicación de fertilizante con P. Por lo tanto, por debajo de este valor, el suelo puede ser considerado deficiente en P. El valor crítico puede variar entre tipos de suelos y cultivos. Además, no hay un test P del suelo universal, ya que su eficacia para la estimación de requerimientos de fertilizante depende mucho de las propiedades del suelo. Esto explica por qué sólo en Europa se utilizan más de 6 test de P oficiales dependiendo del país: los tests de Olsen y lactato (amónico o cálcico) son los más habituales en Europa, mientras que en América del Norte, Olsen, Mechlich (test I y III) y Bray son los más empleados.

26.3. EL POTASIO EN EL SUELO

La mayor parte del potasio en suelos se encuentra como componente de los minerales feldespato y mica, minerales primarios comunes en los suelos que explican que el potasio sea un elemento abundante en el suelo (0.3-3% en peso). El potasio de los minerales primarios se libera lentamente por meteorización. Después de esta liberación, el potasio se va a encontrar en formas solubles, intercambiables y no intercambiables. El potasio en la solución del suelo está en equilibrio con K intercambiable que es retenido por atracción electrostática a la carga negativa de las arcillas y la materia orgánica del suelo. El K no intercambiable, también definido como K fijado, se encuentra entre laminillas y en los bordes de minerales de arcilla 2:1 y no se puede considerar como fácilmente disponible para las plantas (Fig. 26.4). Una parte del K

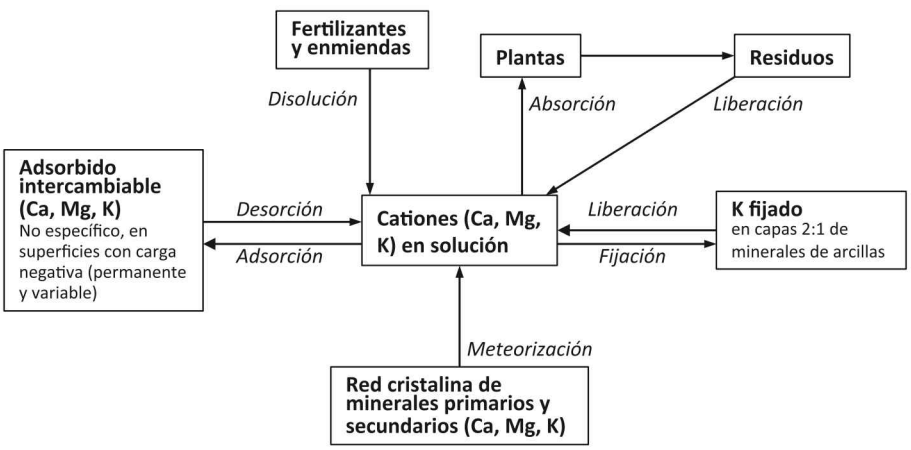


Figura 26.4. Ciclo del K, Ca, y Mg en el suelo. En cursiva: procesos físicos, químicos o biológicos implicados en el ciclo de nutrientes

suministrado como fertilizante queda fijado de esta forma lo que explica por qué no todo el K aplicado se mantiene disponible para las plantas. La fracción del K aplicado que queda fijado es tanto mayor cuanto mayor sea la dosis de fertilizante y mayor sea el contenido de arcilla 2:1 del suelo. La adsorción como formas intercambiables o no intercambiables explica por qué el K se mueve tan poco en el suelo.

El K disponible para las plantas es, básicamente, el que se encuentra en la solución del suelo, más la reserva intercambiable. La concentración de potasio en la disolución suele estar entre 0.2 y 10 meq/L, que por lo general representa menos del 1% del K intercambiable y se puede agotar rápidamente por la absorción del cultivo. El potasio en forma catiónica en la disolución es la única forma en que las plantas son capaces de absorberlo. Tal como se definió para el P, el poder tampón del suelo para K es la capacidad para reponer K en la solución del suelo a partir del asociado a las partículas del suelo, y es crítica para mantener la concentración de K en la solución en rangos adecuados para las plantas. Este poder tampón de potasio depende principalmente del contenido de arcilla y su mineralogía, siendo más alto en los suelos arcillosos con predominancia de minerales de arcilla 2:1.

26.3.1. El potasio del suelo disponible para la planta

Al igual que con P, el manejo de fertilizantes de K debe estar basado en los índices de disponibilidad. Aunque se han propuesto varios índices, los más comunes son los basados en la estimación de K intercambiable O. El método más extendido es la extracción con una disolución de acetato de amonio a pH 7 (Tabla 26.3). Este método ha mostrado en general una buena correlación con la respuesta del cultivo al contenido de potasio del suelo. Otros métodos para determinar K intercambiable, como la extracción con disoluciones de $BaCl_2$ tamponada o NH_4Cl no tamponada, proporcionan resultados similares. Para los suelos ácidos se han propuesto métodos basados en la extracción con ácidos (por ejemplo, Mehlich o Morgan), con buenas correlaciones en general con las cantidades extraídas con acetato de amonio.

Tabla 26.3. Niveles críticos (STL_t) para K extraíble con acetato de amonio en los suelos en función de la capacidad de intercambio catiónico (CEC, cmol (+)/kg) o de la textura. El valor crítico también puede ser calculado usando STL_t = 75 + 2.5 CEC (recomendación Tristate para maíz, trigo, soja y alfalfa) o STL_t = 110 + 2.5 CEC (recomendación general)

Capacidad de intercambio catiónico (CEC)	Nivel crítico	Textura	Nivel crítico
cmol (+)/kg	mg K/kg suelo		mg K/kg suelo
10	150	Arenoso	100
20	180	Franco	150-175
30	210	Arcilloso	200-300
40	240		

26.4. RESPUESTA DE LOS CULTIVOS A LOS FERTILIZANTES DE P O K

Las funciones de producción del rendimiento frente al nutriente aplicado (P o K) muestran respuestas similares con pendiente decreciente a medida que aumenta la dosis (Fig. 26.5 y 26.6). La relación entre el rendimiento y la absorción de P es similar a la descrita para N, es decir, más o menos recta inicialmente y después puede llegar a un máximo (Fig. 26.7). La relación entre la dosis de fertilizante y la absorción de P es inicialmente lineal y también se puede llegar a un máximo que indica saturación en la absorción del nutriente (Fig. 26.7). La intersección con el eje Y de la porción lineal indica la cantidad de P que el cultivo puede absorber de fuentes distintas al fertilizante (P previamente presente en el suelo) y la pendiente es la eficiencia de recuperación (o eficiencia del fertilizante) en el tramo recto de la relación.

La relación entre el rendimiento del cultivo y el K aplicado es del mismo tipo que las descritas para N y P (Fig. 26.6). Los ejemplos mostrados en la figura 26.5 y 26.6 indican que estas relaciones descritas para P y K pueden variar con el nivel de fertilización nitrogenada o sistema de manejo del suelo. Esto revela que la nutrición y la fertilización para un nutriente determinado no pueden considerarse de forma aislada. Los efectos sinérgicos con otros nutrientes, tales como el N, explican que la acumulación de P y K puede ser más rápida si se realiza un suministro apropiado de N; esto implica también una mejor respuesta en rendimiento del cultivo al suministro de P o K. El aporte adecuado de agua implica también una mejor respuesta del cultivo al abonado con P o K en términos de acumulación y de rendimiento ya que se consigue una absorción más eficiente de los nutrientes. El contenido de agua del suelo es fundamental para explicar el flujo de nutrientes a las raíces, especialmente en aquellos que se mueven básicamente a través de mecanismos de difusión debido a su baja concentración en la solución, tales como P y K. El papel clave del conte-

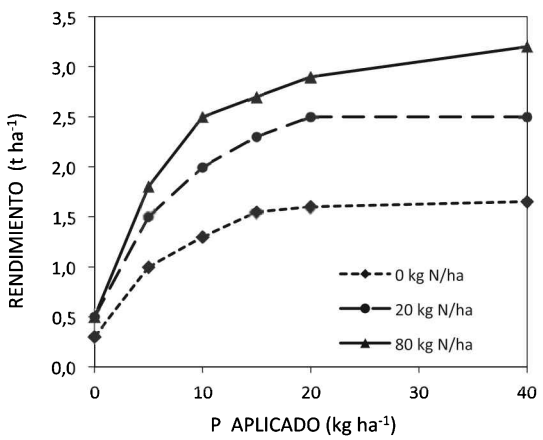


Figura 26.5. Respuesta del rendimiento del trigo a la aplicación de fertilizante de P con un aumento de la dosis de fertilizante nitrogenado en Australia. Adaptado de Brennan y Bolland (2009) Crop pasture sci 60:566-577

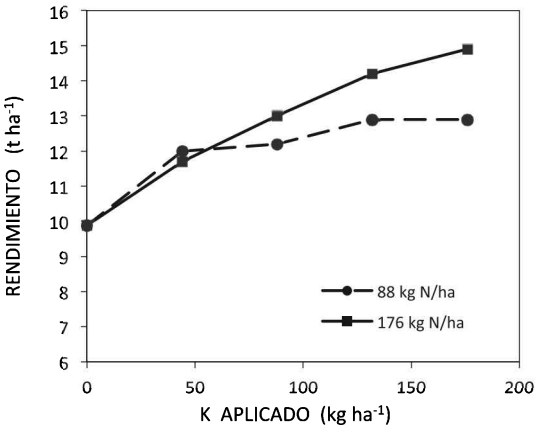


Figura 26.6. Respuesta del rendimiento de arroz a la aplicación de fertilizante de K con un aumento de la dosis de fertilizante nitrogenado en Arkansas. Adaptado de Slaton et al. (2010) Rice Response to Nitrogen and Potassium Fertilization Rate. Arkansas Agric Extension Service Res 591.available at http://arkansasagnews.uark.edu/591-38.pdf

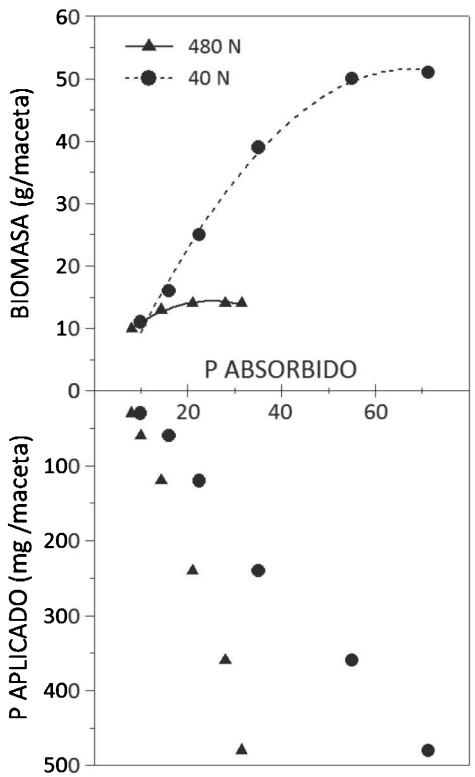


Figura 26.7. Respuesta de la producción de biomasa de maíz a la absorción de P y de la absorción de P al P aplicado para diferentes niveles de suministro de nitrógeno.

nido de agua en la absorción de nutrientes por las plantas explica por qué en zonas mediterráneas secas (300-500 mm de precipitación anual) los valores críticos de P Olsen puede variar de 4-5 en años lluviosos a 8-9 mg/kg en los años secos, lo que refleja la necesidad de más P en el suelo para un suministro óptimo de las plantas en los años secos. Estos ejemplos justifican la necesidad de prácticas de cultivo adecuadas e integradas para lograr la mejor respuesta de los cultivos a los insumos suministrados.

26.5. ESTRATEGIAS DE FERTILIZACIÓN DE FÓSFORO Y POTASIO

Los principios para el establecimiento de los planes de fertilización con P y K en función de los tests de disponibilidad en suelo varían según el país. En la estrategia de *suficiencia,* el principal objetivo es la máxima rentabilidad a corto plazo del fertilizante aplicado y el riesgo mínimo de impacto ambiental relacionados con el exceso de fertilizante, aceptando un cierto riesgo de pérdida de rendimiento. Por otro lado, *la estrategia de incremento y mantenimiento* busca la rentabilidad a largo plazo de la fertilización, el máximo rendimiento a largo plazo, y la reducción del riesgo de pérdida de rendimiento debido a la baja fertilidad.

Debido a las reacciones complejas de los fertilizantes de P y K en los suelos, valores de índices de disponibilidad o test de suelo por encima de los valores críticos es la única garantía de suministro óptimo de P o K a las plantas ya que la reserva disponible de nutrientes en el suelo es suficiente para un suministro óptimo (sin respuesta a los fertilizantes). Por debajo de los valores críticos, no hay garantía de suministro óptimo de P o K a los cultivos debido a la incertidumbre sobre la fracción del fertilizante aplicado que finalmente se encuentra disponible para las plantas. Por lo tanto, de acuerdo con ambas estrategias de fertilización, una condición óptima de suelo desde un punto de vista de suministro de nutrientes es permanecer en valores por encima del valor crítico definido para el análisis de suelo recomendado. Los tests de suelo y los valores críticos pueden variar ampliamente para P dependiendo de la región/país y en función de las propiedades del suelo. En general, el valor crítico dependerá de las necesidades de cada cultivo (extracciones altas o bajas de P o K), del contenido de arcilla del suelo para P y K, y del contenido de carbonato para P.

26.5.1. La estrategia de incremento y mantenimiento

De acuerdo con esta estrategia, si el nivel del test de suelo (STL) está por debajo del valor crítico (STL_t) el nivel de fertilidad del suelo debe ser corregido para llevarlo hasta un valor ligeramente por encima del valor crítico, de acuerdo con las indicaciones que figuran en las Tablas 26.2 y 26.3 para P y K, respectivamente. El aumento de la disponibilidad de P o K hasta niveles óptimos por lo general requiere varios años, siendo claramente más lento si los suelos tienen una alta capacidad de fijación y alto poder tampón para los nutrientes. Hay que indicar que la tasa de acu-

mulación de una estrategia de suministro dada puede variar de suelo a suelo ya que las reacciones de P y K en el suelo no se pueden predecir con precisión.

Después de alcanzar un nivel adecuado de fertilidad por encima del valor crítico, la aplicación de fertilizantes debe compensar la exportación de nutrientes por el cultivo anterior. Las exportaciones de nutrientes se calculan como el producto de la cantidad de biomasa que sale del campo y su concentración de nutrientes (Tabla 26.4). El análisis del suelo debe realizarse cada 3-4 años para comprobar la evolución del nivel de fertilidad y cambiar las dosis de fertilizantes de acuerdo con la evolución de los niveles del test de suelo.

Tabla 26.4. Concentración media de P y K (% peso seco) en diferentes órganos cosechables y residuos de diferentes especies cultivadas. Una lista más completa se proporciona en el Apéndice 26.1.

Especie	Concentración (% sobre materia seca)			Concentración (% sobre materia seca)		
	Parte cosechada	P	K	Parte no cosechada	P	K
Alfalfa (heno)	Biomasa	0.26	2.10			
Manzano	Fruto	0.05	0.75			
Cebada	Grano	0.42	0.54	Paja	0.1	1.8
Judía (Phaseolus) (seca)	Semilla (seco)	0.54	2.7	Residuos	0.14	1.3
Algodón	Fibra + semilla	0.41	0.49	Residuos	0,1	1.6
Lechuga	Hojas	0.75	6.67			
Maíz (grano)	Grano	0.32	0.34	Residuos	0,1	1.5
Mijo	Grano	0.38	0.39	Residuos	0.04	1.6
Olivo	Fruto	0.14	1.25			
Naranjo	Fruto	0.14	1.35			
Palmera	Racimo de frutos	0.09	0.75			
Melocotón	Fruto	0.12	1.55			
Guisante (seco)	Semilla (seco)	0.48	1.3	Paja	0,3	1.2
Patata	Tubérculo	0.25	2	Residuos	0,2	3.95
Colza	Semilla	0.62	0.98	Residuos	0,1	0,8
Arroz	Grano	0.29	0.28	Paja	0.09	1.5
Sorgo (grano)	Grano	0.33	0.39	Residuos	0.13	0,73
Soja	Semilla	0.66	1.5	Residuos	0.06	0.57
Remolacha azucarera	Raíz sin corona	0.25	1.54	Residuos	0.22	5.8
Caña de azúcar (virgen)	Tallos	0.01	0,2	Hojas + tallos	0.07	0.12
Girasol	Aquenio	0.63	0,72	residuos	0.14	2.52
Tomate	Fruto	0.47	4.28	residuos	0,1	1.9
Trigo invierno	Grano	0.37	0.46	Paja	0.06	1.2

Una posible formulación de la estrategia de incremento y mantenimiento podría ser:

$STL < STL_t$ Añadir la exportación de nutrientes + más P (según modelos)

$STL_t < STL < 2\ STL_t$ Agregar sólo la exportación de nutrientes (o ligeramente por encima de las exportaciones)

$STL > 2\ STL_t$ *(límite de mantenimiento)* Añadir menos P que la exportación de nutrientes (por ejemplo, 50%) o no fertilizar

Para el caso de P, los modelos de acumulación para estimar la dosis de fertilizante P para valores de test de suelo por debajo del valor crítico podrían basarse en la recomendación Tri States desarrollada en Estados Unidos:

$$Dosis\ P\ \left(kg\ \frac{P}{ha}\right) = P\ exportado + \frac{10\ \rho_b\ Z}{N_{años}}\ (STL_t - STL) \tag{26.2}$$

STL y STL_t se dan en mg/kg; ρ_b es la densidad aparente (t/m^3), Z es la profundidad del suelo a considerar (m). La dosis de P debe ser inferior a 100 kg P/ha. $N_{años} = 1$ si la dosis de P resulta inferior a 100 kg P/ha, y un valor mayor en caso necesario, hasta lograr una dosis de P inferior a 100 kg P/ha.

En suelos con una alta capacidad de fijación de P, la aplicación del P equivalente a las exportaciones de los cultivos en el caso de $STL_t < STL < 2\ STL_t$ podría conducir a una disminución del STL a largo plazo. En este caso, podrían recomendarse aplicaciones de P por encima de las exportaciones de los cultivos, por ejemplo, entre 10 y 30% más que las exportaciones en función de la capacidad del suelo para fijar P (contenido en arcilla y carbonatos).

En el caso del K, una ecuación de acumulación se basa en el aumento deseado del K en el suelo (STL_t - STL) que se corrige por un factor f_K que depende de la capacidad de fijación de K de los suelos (Tabla 26.5).

$$Dosis\ K\ \left(kg\ \frac{K}{ha}\right) = K\ exportado + \frac{10\ \rho_b\ Z f_k}{N_{años}}\ (STL_t - STL) \tag{26.3}$$

donde ρ_b es la densidad aparente (t/m^3), Z es la profundidad del suelo a corregir (m) y $N_{años}$ es el número de años para llegar a STL_t. $N_{años} = 1$ si la dosis de K resulta menor de 275 kg K/ha; $N_{años}$ se debe considerar mayor que 1 para lograr dosis de K siempre inferiores a 275 kg K/ha.

La acumulación de P y K se consigue normalmente en varios años y el control periódico de los niveles de fertilidad (por lo menos cada 3 años) es necesario para comprobar si se alcanzan los valores críticos. Las aplicaciones masivas de P y K son menos eficientes, en términos de la relación entre nutriente disponible respecto a la cantidad total aplicada. Así, las aplicaciones masivas permiten alcanzar STL_t en

tiempos más cortos, pero con un consumo total de fertilizantes mayor (y por tanto coste superior) que con las aplicaciones más fraccionadas. Esta es la razón por la que en algunas áreas (por ejemplo, algunos estados de los EE.UU.) se recomiendan máximos de 100 kg P/ha y 275 kg K/ha en la estrategia de acumulación y mantenimiento. Este es el límite establecido para decidir entre 1 o más años en las ecuaciones 26.2 y 26.3.

Tabla 26.5. Factor de corrección f_K para la estrategia de acumulación en la fertilización con K

Textura	f_K
Arenoso y franco-arenoso	1.1 - 1.2
Franco y franco-limoso	1.5 - 1.7
Franco-arcilloso	2
Arcilloso	2.5 - 5

Por encima de un cierto nivel, que se puede definir como "límite de mantenimiento", se aplican dosis inferiores a la exportación de los cultivos (por ejemplo, 50%) o no se aplica fertilizante. El límite de mantenimiento puede variar dependiendo de la recomendación, pero en general una recomendación razonable podría ser que se considere como el doble del valor umbral.

Ejemplo 26.1.

La concentración de P en un suelo determinado por el método de Olsen en los primeros 25 cm es 7 ppm, mientras que la concentración de K es 100 ppm (método de acetato de amonio). En este suelo, se va a cultivar maíz con un rendimiento esperado de 15 t/ha (14% de humedad). Los valores críticos para P y K son 15 ppm y 250 ppm, respectivamente. La densidad aparente del suelo es de 1.4 t/m^3. La textura es arcillosa (45% de arcilla) y el contenido de carbonato es del 30%. Se trata de calcular las dosis de P y K para estas condiciones. Se calcularán también las dosis si P Olsen es 27 ppm y K extraíble con acetato es de 300 ppm.

Fertilización según estrategia de acumulación y mantenimiento

Extracción y exportación del cultivo: la cantidad de materia seca es exportada es:

$$15000 \text{ kg/ha} \cdot (1 - 0.14) = 12900 \text{ kg materia seca grano/ha}$$

De acuerdo con la Tabla 26.4, las concentraciones de P y K en el grano de maíz son 0.32% y 0.34%, por lo tanto, las cantidades de P y K en el grano son:

$$12900 \text{ kg/ha} \cdot 0.0032 \text{ kg P/kg} = 41.25 \text{ kg P/ha}$$

$$12900 \text{ kg/ha} \cdot 0.0034 \text{ kg K/kg} = 43.8 \text{ kg K/ha}$$

Ahora usamos la ec. 26.2:

Dosis P = 41.25 + 10·1.4·0.25 · (15 – 7) = 69.3 ≈ 69 kg P/ha (340 kg superfosfato triple/ha)

Si P Olsen es de 27 ppm, como está por debajo del límite de mantenimiento (30 ppm), sólo hay que aplicar los nutrientes exportados:

Dosis P = 41.25 ≈ 41 kg de P/ha (por ejemplo 205 kg ST/ha)

Para potasio:

Aumento de K = 250-150 = 100 ppm (mg/kg)

A partir de la Tabla 26.5 para suelo arcilloso tenemos un rango de f_K entre 2.5 y 5 y elegimos f_K = 3.

Dosis K (kg K/ha) = 43.8 + 10 · 1.4 · 0.25 · 3 · (250 – 150) = 1050 + 43.8 = 1093.8 kg K/ha,

mucho mayor que 275 kg/ha, por lo que tenemos que hacer $N_{años}$ mayor que 1. Es fácil comprobar que para evitar una dosis superior a 275 kg K/ha tenemos que asumir $N_{años}$ = 5 por lo que:

Dosis K (kg/ha) = 48.3 + (10 · 1.4 · 0.25 · 3)/5 (250 – 150) = 258.3 kg K/ha

que puede ser suministrado con 258.3/0.5 = 516.6 kg de cloruro potásico.

En cualquier caso, como se ha comentado anteriormente, estas no son estimaciones precisas y es necesario realizar análisis periódicos del K del suelo para saber cuándo se ha alcanzado el nivel crítico.

Si el K extraíble con acetato es de 300 ppm, al estar por encima del umbral y por debajo del límite de mantenimiento, debemos compensar solamente los nutrientes exportados:

Dosis de K = 43.8 kg de K/ha (por ejemplo, 87.6 kg Cl K/ha)

26.5.2. La estrategia de suficiencia

Si la fertilidad inicial está por debajo del valor crítico, esta estrategia comienza por aplicaciones orientadas a incrementar el P disponible en el suelo que se pueden realizar en varios años como en el caso de la estrategia de incremento y mantenimiento. Una vez que el test del suelo está por encima del crítico, se vuelve a analizar cada año, y se aplica fertilizante sólo cuando el nivel de nutrientes es inferior al valor crítico. El enfoque de suficiencia se recomendó inicialmente para evitar problemas ambientales derivados de un enriquecimiento excesivo de P del suelo que conduce a la alta concentración de P en las aguas superficiales que desencadenan la eutrofización. Además tiene otra ventaja: promueve un mayor uso del P y el K resi-

duales en el suelo. Esto quiere decir que un agotamiento progresivo de los niveles de P y K en los suelos puede aumentar la transformación de formas no disponibles en formas disponibles y por lo tanto un mayor uso por las plantas de formas no disponibles. En cualquier caso, esto puede implicar un agotamiento progresivo de las reservas de nutrientes del suelo que a largo plazo puede requerir del aumento de las dosis de fertilizante.

26.6. OTROS NUTRIENTES

La aplicación de otros nutrientes distintos a N, P y K se hace generalmente siguiendo una estrategia de suficiencia: se aplican sólo si se espera que haya deficiencia y por tanto incremento de rendimientos con su aplicación. El calcio y el Mg tienen un ciclo similar al descrito para el K (Fig. 26.4). Las cantidades disponibles también son equivalentes a los nutrientes en solución además de la reserva intercambiable. Todos los métodos de extracción utilizados para análisis de K también pueden ser útiles como índices de disponibilidad de Ca y Mg. Los valores críticos para Ca y Mg de acuerdo con la extracción de acetato de amonio son 250-500, y 30-60 mg/kg, respectivamente. Los valores críticos aumentan en proporción a la capacidad de intercambio catiónico del suelo. En términos generales, bajos niveles de disponibilidad de Ca son habituales en suelos arenosos ácidos con baja saturación de bases.

La fertilización con K, Ca o Mg debe tener en cuenta los niveles disponibles de otros nutrientes alcalinos o alcalino-térreos ya que se pueden producir efectos antagonistas. Una relación K/Mg intercambiable por encima de 0.5 puede inducir una deficiencia de Mg, y valores inferiores a 0.1 promover la deficiencia de K. Por otro lado, una relación Ca/Mg por encima de 10 puede promover la deficiencia de Mg, mientras que cuando es inferior a 2, puede aparecer la deficiencia de Ca.

La disponibilidad de micronutrientes para las plantas no sólo está determinada por su cantidad en el suelo. En el caso de los metales (Fe, Cu, Mn y Zn), se ve afectada por las condiciones del suelo que afectan a su solubilidad y a la capacidad de las plantas para movilizarlos, absorberlos y transportarlos. El caso paradigmático es el del Fe, un elemento bastante abundante en los suelos cuya disponibilidad está claramente reducida en suelos calcáreos. La deficiencia de hierro, conocida como clorosis férrica, es la consecuencia de la insolubilidad de compuestos de Fe a pH básico y del fracaso de los mecanismos que las plantas tienen para movilizarlo y absorberlo del suelo y para transportarlo a través de membranas celulares. Estos mecanismos varían según especies, y por tanto la incidencia del problema. La clorosis férrica es un problema agronómico relevante en la producción agrícola en suelos calcáreos.

El análisis más usual en suelo para micronutrientes es la extracción con el agente quelante DTPA (Tabla 26.6.). Para Fe, la extracción con oxalato de amonio por lo general proporciona mejores resultados que las extracciones con DTPA. En el caso de Fe, el contenido de carbonato de calcio activo ha sido también usado generalmente como un índice para predecir su deficiencia.

Tabla 26.6. Indice de disponibilidad (análisis de suelo) para los micronutrientes y valores críticos

Micronutrientes	Método	Valores críticos (mg/kg)	Condiciones de uso
Boro	Agua caliente	0.1-2	
Cobre	Bicarbonato de amonio-DTPA (AB-DTPA Sultanpour)	0.5-2.5	AB-DTPA y DTPA se recomiendan en suelos básicos
	DTPA	0.1-2.5	
Hierro	AB-DTPA	4.0-5.0	Suelos básicos
	DTPA	2.5-5.0	
	"Oxalato amónico rápido"	350-900	Suelos básicos; los valores umbrales dependen de sensibilidad de los cultivos a la clorosis de Fe (por ejemplo, 350 para olivo y vid)
	Hidroxilamina no tamponada	10	Suelos básicos;valor umbral definido para los cultivos sensibles a la clorosis férrica
Manganeso	AB-DTPA	0.5-5.0	Suelos básicos
	DTPA	1.0-5.0	
Molibdeno	Oxalato amónico pH 3.3	0.1-0.3	
Zinc	AB-DTPA	0.5-1.0	Suelos básicos
	DTPA	0.2-2.0	

26.7. EL MOMENTO DE APLICACIÓN Y EL FRACCIONAMIENTO DE LOS FERTILIZANTES CON P O K

Los fosfatos se han utilizado tradicionalmente como fertilizantes de presiembra, pero también pueden ser incorporados durante la siembra, lo que se recomienda en no laboreo mediante el uso de maquinaria adecuada. La incorporación contribuye a disminuir el riesgo de pérdidas de P incidentales (por ejemplo, por lluvia inesperada después de la fertilización) y evita el enriquecimiento sólo de la capa superficial lo que facilitaría las pérdidas por escorrentía o erosión. La aplicación debe realizarse con más anticipación cuanto menor sea la solubilidad (no menos de tres meses antes de la siembra para abonos muy poco solubles como la roca de fosfato).

El fraccionamiento del fertilizante de P es una práctica poco común. Se puede justificar en suelos muy arenosos saturados con P para evitar la lixiviación. Puede ser también recomendable porque se ha encontrado que las dosis masivas favorecen la retrogradación (conversión a formas no disponibles) y disminuyen la eficiencia de recuperación. Por lo tanto, en suelos muy bajos en fósforo, o con alto contenido de calcio o en cultivos con alto consumo de P, se puede considerar el fraccionamiento

con un fertilizante con P soluble. La principal limitación para el fraccionamiento del fertilizante de P, como se hace habitualmente con el N, proviene de su baja movilidad en el suelo. En condiciones de no laboreo o laboreo reducido, la aplicación en superficie daría lugar a un enriquecimiento en P de la superficie del suelo, aumentando el riesgo de pérdidas de P y limitando el crecimiento radical en profundidad. En estas condiciones resulta recomendable la aplicación localizada en profundidad. Por tanto, parece recomendable en muchas situaciones el fraccionamiento y la incorporación al suelo del fertilizante fosfórico, sobre todo cerca del sistema radical. La fertirrigación puede cumplir con estos requisitos. Este método de aplicación no sólo puede facilitar un alto fraccionamiento del fertilizante de P, sino también la ubicación cerca de las raíces. Además las condiciones de riego favorecen el movimiento de P hacia las raíces. Todo esto resulta en una eficiencia mucho más alta del P aplicado con fertirrigación que con aplicaciones de fondo tradicionales.

Como el P muestra una baja movilidad en el suelo, puede ser recomendable ubicarlo cerca de las raíces mediante la aplicación en bandas en la siembra, especialmente en suelos pobres en P, para mejorar su uso por las plantas. La aplicación localizada puede ayudar en la reducción de la retrogradación al saturar la capacidad de fijación de un volumen más reducido de suelo, el fertilizante queda más cerca de las raíces, y por lo general promueve un crecimiento temprano del cultivo (efecto starter). La cantidad de P que puede ser aplicado en bandas no está limitada, excepto si se aplica como fosfato de amonio ya que el amonio puede ser fitotóxico a concentraciones elevadas; en este caso, se deben aplicar menos de 40 kg N/ha como amonio. Los fertilizantes en bandas en la siembra deben estar separados de la semilla (5 cm al lado y 5 cm por debajo) para evitar problemas de nascencia debido a la alta concentración de sales.

La aplicación de P como fertilizantes orgánicos o enmiendas, con la materia orgánica, debe ser también considerada para mejorar la eficiencia. La materia orgánica compite con el P por los sitios de adsorción y disminuye la precipitación en forma de fosfatos metálicos insolubles, aumentando así claramente la recuperación del P aplicado. Esto explica por qué se han encontrado habitualmente mayores incrementos del test de P del suelo con la aplicación de estiércol en comparación con las aplicaciones de fertilizantes inorgánicos solubles. La aplicación de P como subproductos orgánicos también está ganando interés en la actualidad como una estrategia de reciclaje de P para hacer una agricultura menos dependiente de un recurso no renovable.

Las estrategias consideradas para P pueden ser también aplicadas para el fertilizante de K que también se suele aplicar antes o durante la siembra. El fraccionamiento y la localización en bandas son buenas opciones ya que contribuyen a la saturación del suelo y al mantenimiento de alta concentración en la solución del suelo. Sin embargo, la aplicación conjunta con materia orgánica no mejora la eficiencia de recuperación, excepto en suelos muy arenosos, ya que el único efecto de la materia orgánica sobre el ciclo de K del suelo es proporcionar más superficie cargada y por lo tanto más capacidad de retención si el contenido de arcilla es muy bajo.

BIBLIOGRAFÍA

Black CA (1993) Soil fertility evaluation and control.Lewis Publishers, Boca Raton FL

FAO (2008) Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use: reconciling changing concepts of soils phosphorus behaviour with agronomic Information. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 18, FAO, Rome

Johnston AE (2005) Phosphorus nutrition of arable crops. In: Sims JT, Sharpley AN(ed) Phosphorus: agriculture and environment. Soil SciSocAmer, Madison, WI, pp 495-519

Matar A, Torrent J, Ryan J (1992) Soil and fertilizer phosphorus and crop responses in the dryland mediterranean zone. Adv Soil Sci 18: 81-146

McLean EO, Watson ME (1985) Soil measurements of plant-available potassium. In: Munson RD (ed) Potassium in agriculture. ASA, CSSA, SSSA. Madison WI

Pan WL (2012) Nutrient interaction in soil fertility and plant nutrition. In: Huang PM, Li Y, Sumner ME (eds) Handbook of soil sciences, resource management and environmental impacts (2nd ed), CRC Press, Boca RatonFL. pp 16-1-16-11

Sims JT, McGrath J (2012) Soil fertility evaluation. In: Huang PM, Li Y, Sumner ME (eds) Handbook of soil sciences, resource management and environmental impacts (2nd ed), CRC Press, Boca Raton FLpp 13-1-13.36

Vitosh ML, Johnson JW, Mengel DB (eds) (1995) Tri-state fertilizer recommendations for corn, soybeans, wheat and alfalfa. Michigan St Uinv, Ohio St Univ, Purdue Univ. Extension bull E-2567

Sims JT, Sharpley AN (2005) Phosphorus: agriculture and the environment. ASA, CSSA and SSSA. Madison, WI

Apéndice 26.1. Concentración media de P y K (% peso seco) en órganos cosechados y residuos de distintas especies cultivadas

CEREALES & PSEUDOCEREALES		Cosechado	% peso seco		No cosechado	% peso seco	
			P	K		P	K
Cebada (2 carreras)	Hordeum vulgare	Grano	0.35	0.49	Paja	0.08	2.1
Cebada (6 carreras)	Hordeum vulgare	Grano	0.42	0.54	Paja	0.1	1.8
Alforfón	Fagopyrum esculentum	Semilla	0.35	0.46			
Maíz	Zea mays	Grano	0.32	0.34	Residuos	0.1	1.5
Mijo africano	Setaria italica	Grano	0.34	0.35	Residuos		1.6
Mijo perla	Pennisetum glaucum	Grano	0.38	0.39	Residuos	0.04	1.6
Mijo común	Panicum miliaceum	Grano	0.34	0.48	Residuos		1.6
Avena	Avena sativa	Grano	0.36	0.44	Paja	0.1	2.3

Quinoa	Chenopodium quinoa	Semilla	0.41	1.12			
Arroz cáscara	Oryza sativa	Grano	0.29	0.28	Paja	0.09	1.5
Arroz blanco	Oryza sativa	Grano	0.3	0.45	Paja	0.09	1.5
Centeno	Secale cereale	Grano	0.38	0.52	Paja	0.09	0.97
Sorgo	Sorghum bicolor	Grano	0.33	0.39	Residuos	0.13	0.73
Triticale	X Triticosecale rimpaui	Grano	0.34	0.57	Paja	0.03	1.2
Trigo espelta	Triticum spelta	Grano	0.42	0.44	Paja	0.13	1.4
Trigo harinero (duro)	Triticum aestivum	Grano	0.43	0.45	Paja	0.06	1.2
Trigo harinero (blando)	Triticum aestivum	Grano	0.37	0.46	Paja	0.06	1.2
Trigo duro	Triticum durum	Grano	0.42	0.5	Paja	0.06	1.2
LEGUMINOSAS		**Cosechado**	**P**	**K**	**No cosechado**	**P**	**K**
Judía	Phaseolus spp.	Semilla (seco)	0.54	2.7	Paja	0.14	1.3
Garbanzo (desi)	Cicer arietinum	Semillas	0.4	1.2	Paja	0.16	2.3
Garbanzo (kabuli)	Cicer arietinum	Semillas	0.4	1.2	Paja	0.16	2.3
Caupí	Vigna unguiculata	Semilla	0.52	1.5	Paja	0.28	1.55
Haba	Vicia faba	Semilla	0.47	1.2	Paja	0.2	1.6
Lenteja	Lens culinaris	Semilla	0.43	0.86	Paja	0.14	1.15
Guisante	Pisum sativum	Semilla (seco)	0.48	1.3	Paja	0.3	1.2
Cacahuete	Arachis hypogaea	Frutos	0.35	0.56	Paja	0.14	1.38
Soja	Glycine max	Semilla	0.66	1.5	Residuos	0.06	0.57
FORRAJERAS		**Cosechado**	**P**	**K**	**No cosechado**	**P**	**K**
Alfalfa (heno)	Medicago sativa	Biomasa	0.26	2.10			
Poa (heno)	Poa pratensis	Biomasa	0.28	1.92			
Bromus (heno)	Bromus sp.	Biomasa	0.16	1.64			
Alpistera (heno)	Phalaris arundinacea	Biomasa	0.28	2.99			
Trébol (blanco) (heno)	Trifolium repens	Biomasa	0.35	2.30			
Trébol-Alsike (heno)	Trifolium hybridum	Biomasa	0.25	2.48			
Trébol-púrpura (heno)	Trifolium incarnatum	Biomasa	0.22	2.76			
Trébol-Rojo (heno)	Trifolium pratense	Biomasa	0.26	1.89			
Trébol-Blanco (heno)	Trifolium repens	Biomasa	0.35	2.25			
Trébol-Blanco-Ladino (heno)	Trofolium repens	Biomasa	0.32	2.43			
Lolium (heno)	Lolium arundinaceum	Biomasa	0.32	2.36			

Hierba (heno)	Poaceae	Biomasa	0.22	1.45			
Hierba (ensilado)	Poaceae	Biomasa	0.32	1.88			
Maíz (ensilado)	Zea mays	Biomasa	0.20	1.00			
Mijo africano (ensilado)	Setaria italica	Biomasa	0.18	1.94			
Mijo perla (ensilado)	Pennisetum glaucum	Biomasa	0.26	1.63			
Avena (heno)	Avena sativa	Biomasa	0.24	1.26			
Dactilo (verde)	Dactylis glomerata	Biomasa	0.18	2.64			
Dactilo (heno)	Dactylis glomerata	Biomasa	0.25	2.80			
Centeno (heno)	Secale cereale	Biomasa	0.22	1.24			
Raigrás (heno)	Lolium perenne	Biomasa	0.20	1.42			
Sorgo	Sorghum bicolor	Biomasa	0.21	1.10			
Melilotus (heno)	Melilotus sp.	Biomasa	0.24	1.65			
Fleo (heno)	Phleum pratense	Biomasa	0.17	1.63			
Lotus (heno)	Lotus corniculatus	Biomasa	0.23	1.89			
Nabo (fresco)	Brassica rapa var. rapa	Biomasa	0.42	3.02			
Veza (heno)	Vicia sativa	Biomasa	0.36	2.24			
Veza vellosa (heno)	Vicia villosa	Biomasa	0.36	2.23			
Thinopyrum (heno)	Thinopyrum spp.	Biomasa	0.07	2.70			
ACEITE, AZUCAR Y FIBRA		**Cosechado**	**P**	**K**	**No cosechado**	**P**	**K**
Algodón	Gossypium hirsutum	Fibra+Semilla	0.41	0.49	Residuos	0.1	1.6
Lino	Linum ussitatisimum	Semilla	0.57	0.84	Residuos	0.08	1.74
Adormidera	Papaver somniferum	Cápsulas	0.6	2.4	Hojas+Tallos	0.3	3.1
Colza	Brassica spp	Grano	0.62	0.98	Residuos	0.1	0.8
Cártamo	Carthamus tinctorius	Grano	0.6	0.75	Residuos	-	-
Remolacha azucarera	Beta vulgaris	Raíz sin corona	0.25	1.54	Parte aérea	0.22	5.8
Caña de azúcar	Saccharum spp.	Cañas	0.01	0.2	Hojas+Tallos	0.07	0.12
Girasol	Helianthus annuus	Grano	0.63	0.72	Residuos	0.14	2.52
Tabaco Burley	Nicotiana tabacum	Hoja+Tallo	0.31	3.86	Tallos	0.31	3.86
Tabaco Virginia	Nicotiana tabacum	Hojas	0.27	2	Tallos	0.27	2
CULTIVOS HORTICOLAS		**Cosechado**	**P**	**K**	**No cosechado**	**P**	**K**
Alcachofa	Cynara scolimus	Flor	0.51	2	Residuos	-	-
Espárrago (verde)	Asparagus officinalis	Tallo	0.69	3.4			
Espárrago (blanco)	Asparagus officinalis	Tallo	0.74	4			
Remolacha	Beta vulgaris	Raíz	0.32	2.46	Parte aérea	0.44	6.26

Coles de Bruselas	Brassica oleracea	Hojas	0.51	3.25			
Repollo	Brassica oleracea	Hojas	0.35	2.73			
Zanahoria	Daucus carota	Raíz	0.33	2.43	Parte aérea	0.19	1.88
Coliflor	Brassica oleracea	Cabeza	0.66	3.22			
Apio	Apium graveolens	Hojas	0.66	4.8		0.66	4.8
Escarola	Cichorium intybus	Hojas	0.23	4			
Pepino	Cucumis sativus	Fruto	0.53	4.25	Residuos	-	-
Berenjena	Solanum melongena	Fruto	0.31	3	Residuos	-	-
Endivia	Cichorium endivia	Hojas	0.45	5.6			
Haba (verde)	Vicia faba	Frutos	0.5	1.32	Residuos	-	-
Puerro	Allium porrum	Bulbo	0.21	1.06	Residuos	-	-
Lechuga Iceberg	Lactuca sativa	Hojas	0.5	2			
Lechuga romana	Lactuca sativa	Hojas	0.75	6.67			
Melón	Cucumis melo	Fruto	0.16	2.58	Residuos	-	-
Melón Cantaloup	Cucumis melo	Fruto	0.36	3.16	Residuos	-	-
Perejil	Petroselinum crispum	Hojas	0.4	2.7			
Pimiento (verde)	Capsicum annuum	Frutos	0.35	2	Residuos	-	-
Pimiento (rojo)	Capsicum annuum	Frutos	0.3	2.4	Residuos	-	-
Calabaza	Cucurbita spp.	Fruto	0.39	2.78	Residuos	-	-
Rábano	Raphanus sativus	Raíz	0.4	3.17	Residuos	-	-
Espinaca	Spinacia oleracea	Hojas	0.56	5.66			
Calabacín	Cucurbita pepo	Fruto	0.4	3.5	Residuos	-	-
Tomate	Lycopersicon esculentum	Fruto	0.47	4.28	Residuos	0.1	1.9
Sandía	Citrullus lanatus	Fruto	0.11	1.33	Residuos	-	-
FRUTALES, VIÑAS Y ARBUSTOS		**Cosechado**	**P**	**K**	**No cosechado**	**P**	**K**
Almendro	Prunus amygdalus	Fruto	0.37	0.75			
Manzano	Malus sylvestris	Fruto	0.05	0.75			
Albaricoque	Prunus armeniaca	Fruto	0.14	2.17			
Aguacate	Persea americana	Fruto	0.15	2.31			
Platanera	Musa paradisiaca	Fruto	0.08	1.54			
Chirimoya	Annona cherimola	Fruto	0.15	1.17			
Cerezo	Prunus avium	Fruto	0.01	1.16			
Cocotero	Cocos nucifera	Copra	0.3	5			
Palmera datilera	Phoenix dactylifera	Fruto	0.05	0.84			
Higuera	Ficus carica	Fruto	0.07	1.11			

Vid (mesa)	Vitis vinifera	Fruto	0.05	1.02			
Vid (vino)	Vitis vinifera	Fruto	0.07	0.95			
Pomelo	Citrus paradisi	Fruto	0.11	1.38			
Avellano	Corylus avellana	Fruto	0.33	0.47			
Kiwi	Actinidia spp	Fruto	0.18	1.43			
Limonero	Citrus limon	Fruto	0.12	1.15			
Mango	Mangifera indica	Fruto	0.11	0.95			
Palmera de aceite	Elaeis guineensis	Racimo de frutos	0.09	0.75			
Olivo	Olea europaea	Fruto	0.14	1.25			
Naranjo	Citrus sinensis	Fruto	0.14	1.35			
Melocotonero	Prunus persica	Fruto	0.12	1.55			
Pera	Pyrus communis	Fruto	0.07	0.77			
Caki	Dyospiros kaki	Fruto	0.07	1.01			
Ciruelo	Prunus domestica	Fruto	0.07	1.16			
Granado	Punica granatum	Fruto	0.1	1.04			
Membrillo	Cydonia oblonga	Fruto	0.1	0.95			
Nogal	Juglans regia	Fruto	0.22	0.41			
RAICES, TUBÉRCULOS Y BULBOS		**Cosechado**	**P**	**K**	**No cosechado**	**P**	**K**
Mandioca	Manihot esculenta	Raíz	0.12	0.77			
Ajo	Allium sativum	Bulbo	0.44	1.38	Residuos	0.2	1.3
Cebolla	Allium cepa	Bulbo	0.35	1.2	Parte aérea	0.38	2.75
Patata	Solanum tuberosum	Tubérculo	0.25	2	Parte aérea	0.2	3.95
Batata	Ipomoea batatas	Tubérculo	0.15	1.22			
Ñame (chino)	Dioscorea opposita	Tubérculo	0.15				
Ñame blanco	Dioscorea rotundata	Tubérculo	0.25	2.3			
Ñame (amarillo)	Dioscorea cayenensis	Tubérculo					

Capítulo 27

El fertirriego

F.J. VILLALOBOS
M. QUEMADA
A. DELGADO

RESUMEN:

El fertirriego es la aplicación conjunta de nutrientes junto con el agua de riego. Aunque se adapta mejor al riego por goteo de alta frecuencia también puede ser realzado con otros métodos de riego. El fertirriego requiere un sistema de dosificación y uno o varios tanques para la solución madre donde se incorporan los nutrientes. Las principales características a tener en cuenta para los fertilizantes utilizados en fertirriego son la concentración, la pureza, la solubilidad y la reacción del pH. La calidad del agua de riego ha de ser también considerada, en especial la concentración de bicarbonatos y calcio. El cálculo de las soluciones madre se basa en los requerimientos totales de N, P y K y el volumen total de riego a aplicar. Se han desarrollado recetas específicas de soluciones de fertirrigación para varias especies. Las soluciones nutritivas completas (p.ej. la de Hoagland-Arnon) son fáciles de calcular teniendo en cuenta la concentración real de sales en el agua de riego.

27.1. INTRODUCCIÓN

El fertirriego es la aplicación conjunta de agua y nutrientes, lo que requiere la conexión de un sistema de dosificación de nutrientes al sistema de riego. Aunque esta técnica se puede aplicar en principio a todos los tipos de sistemas de riego, se utiliza generalmente en los sistemas de riego por goteo y en menor medida en los sistemas de aspersión de cobertura completa y máquinas de riego.

Si se usa correctamente, con este manejo de fertilizantes se puede lograr una eficiencia muy alta en la aplicación de nutrientes a los cultivos, sobre todo con riego por goteo de alta frecuencia. Esta alta eficiencia se deriva de:

a) El fertirriego implica, con riego por goteo, una aplicación de fertilizante localizada, que es más eficiente en suelos pobres en nutrientes o de alta capacidad de fijación. Esto es relevante para los nutrientes que se pueden ligar fuertemente a las partículas del suelo tales como P y K.

b) Los sistemas de riego por goteo causan una concentración del sistema radicular dentro de los bulbos húmedos; por tanto, la aplicación de nutrientes se concentra en las zonas de alta densidad radical. Esto contribuye a una mejor absorción de los nutrientes aplicados.

c) Si empleamos riego por goteo de alta frecuencia, el contenido de agua en los bulbos húmedos se suele mantener cerca de capacidad de campo; el alto contenido de agua aumenta el flujo de nutrientes a las raíces a través del flujo de masas o la difusión, aumentando así la eficiencia de los fertilizantes aplicados, lo que significa que una mayor fracción de fertilizantes aplicados es finalmente utilizada por los cultivos.

d) El fertirriego con riego por goteo permite la aplicación muy frecuente de muy bajas dosis de fertilizantes lo que permite ajustar el suministro de nutrientes a los requerimientos de la planta que pueden variar dependiendo de la fase del ciclo. Esto tiene ventajas claras para los nutrientes móviles tales como N, evitando la acumulación de N lo que reduce el riego de pérdidas y permitiendo así una reducción de la dosis total de N. Esto se ilustra cuando comparamos el fertirriego y la N fertilización convencional con una aplicación en fondo y dos en cobertera (Fig. 27.1). Con nutrientes no móviles, tales como P y K, esta aplicación también tiene ventajas ya que la aplicación frecuente de tasas muy bajas mejora la fijación en formas (adsorción vs precipitación en suelos calcáreos en el caso del P) en un equilibrio más acoplado con la solución del suelo, mejorando así la eficiencia de nutrientes aplicados.

El fertirriego puede ser una técnica de aplicación de fertilizantes rentable cuando un sistema de riego por goteo ya ha sido instalado. A pesar de que requiere la instalación de un sistema de dosificación, después de esta inversión inicial, el coste del equipo y de la mano de obra para la aplicación de fertilizantes son generalmente más bajos que con otras técnicas. Como contrapartida, los fertilizantes usados son generalmente más caros.

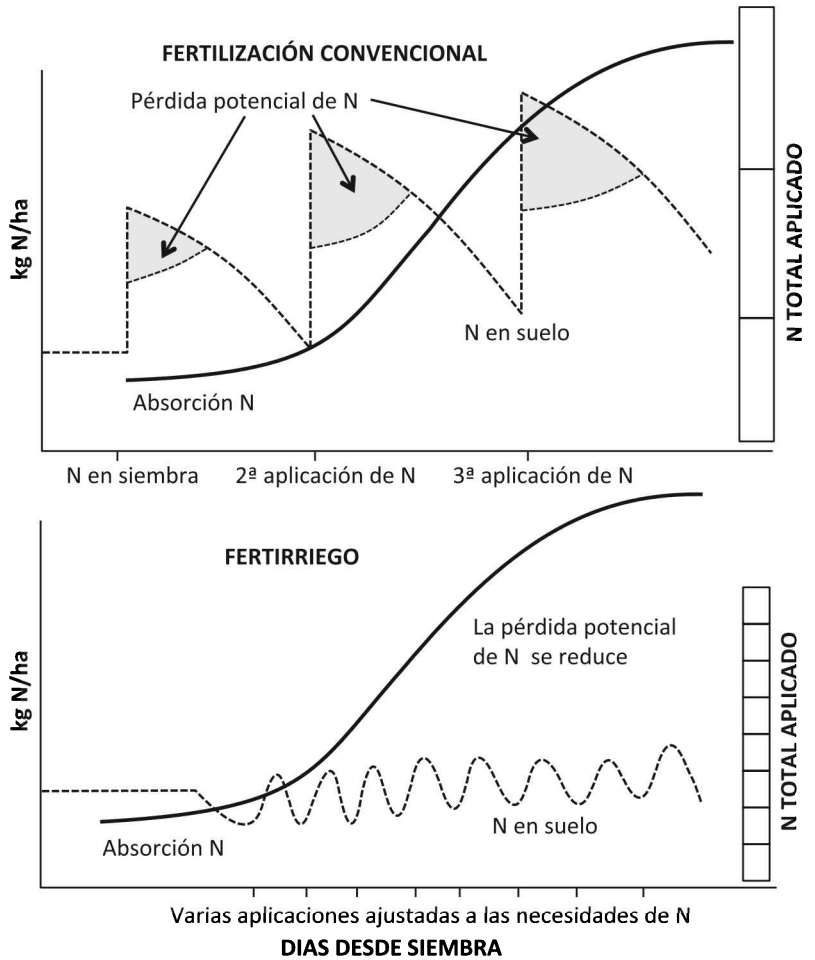


FIGURA 27.1. Evolución temporal de la absorción de N del cultivo y disponibilidad de N en el suelo para la fertilización convencional y con fertirriego.

27.2. SISTEMAS DE DOSIFICACIÓN

El fertirriego se realiza generalmente mediante la inyección de fertilizantes en forma líquida (solución de fertilizante, comercial o preparada en la explotación) en el flujo de agua de riego que va hacia los emisores. Se pueden distinguir dos métodos de dosificación:

a) Proporcional: Se aplica una concentración constante de nutrientes, por lo que la cantidad de nutrientes que entra en el sistema tiene que ser proporcional al caudal de riego.

b) Cuantitativo: Una cantidad total de nutrientes se añade al sistema de riego. La concentración varía con el tiempo.

La inyección de fertilizantes se puede hacer mediante el uso de diferentes dispositivos (Figura 27.2):

a) Diferencial de presión.

Se inserta una válvula de regulación de presión entre la entrada y la salida conectadas al tanque de fertilizante. La diferencia de presión hace que el agua fluya a través del tanque, del que toma los nutrientes y las transporta a la línea principal.

Se puede utilizar para añadir productos sólidos o líquidos y sólo sirve para dosificación cuantitativa. Es fácil de mantener y no requiere energía adicional, pero reduce la presión en la tubería principal. Este método es el más adecuado cuando el fertirriego se realiza a intervalos irregulares.

b) Sistema Venturi. Se instala un dispositivo Venturi (estrechamiento) de forma paralela a la tubería principal. La depresión que resulta en el Venturi provoca la aspiración de la solución de nutrientes. Este sistema permite la dosificación proporcional. La tasa de aplicación de fertilizantes puede ser ajustada y permite aplicar cantidades muy pequeñas pero causa pérdida de presión en la tubería principal.

La depresión depende de la velocidad del agua, por lo que la precisión de un sistema de dosificación Venturi depende de la capacidad del sistema de riego para mantener el flujo constante.

c) Bomba de inyección. Se puede utilizar una bomba eléctrica o hidráulica. En este último caso no se requerirá suministro de energía. Es un sistema fácil de instalar y operar, permite el ajuste de la dosis y no implica pérdida de presión en la tubería principal. Se puede utilizar para la dosificación proporcional o cuantitativa.

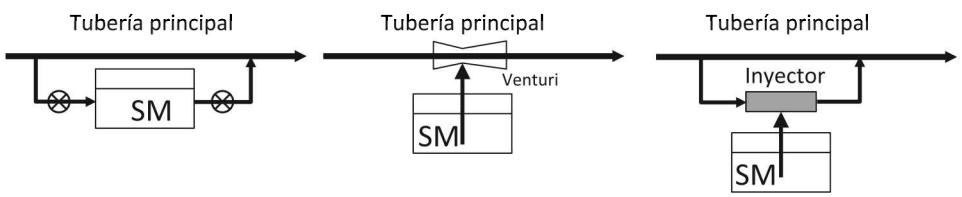


Figura 27.2. Diagramas de sistemas de dosificación en fertirriego a) tanque de fertilización con diferencial de presión, b) con dispositivo Venturi, c) con bomba de inyección hidráulica.

d) La entrada de la bomba de riego se conecta al tanque de fertilizante. La concentración de nutrientes se mantiene constante. Si se añade un sistema para el llenado automático del depósito entonces la concentración puede variar con el tiempo. Este es un método simple y barato, pero difícil de automatizar. Se corre el riesgo de aspiración de aire por la bomba o de daños en la bomba por la corrosión. Este tipo de sistema es el más adecuado para pequeñas instalaciones.

Cualquiera que sea el sistema elegido, es recomendable instalar válvulas de retención para evitar la contaminación de la línea de alimentación si se produce flujo de retorno y un filtro aguas abajo de la inyección de nutrientes.

27.3. ALTERNATIVAS DE FERTIRRIEGO

Los diferentes tipos de fertirriego se pueden definir en función de la combinación de nutrientes aplicada en cada fertirriego.

a) Con soluciones nutritivas completas: a pesar de que es la opción habitual para los sistemas hidropónicos en sustratos artificiales como lana de roca o perlita, también puede ser utilizada para cultivos en tierra. La solución nutritiva aplicada en cada fertirriego debe incluir todos los macro y micronutrientes. Esto requerirá el uso de varios tanques para evitar problemas de incompatibilidad entre diferentes productos fertilizantes:

   Tanque A: Macronutrientes excepto Ca en un medio ácido, aplicando por lo general parte de N y P como ácido nítrico o ácido fosfórico.

   Tanque B: Abonos con Ca en medio neutro o ácido.

   Tanque C: Micronutrientes en medio neutro.

   Otra alternativa para la distribución de los nutrientes:

   Tanque A: NPK.

   Tanque B: N, K, Ca, S y micronutrientes.

   Tanque C: Acido nítrico.

   Si sólo se requiere NPK para la fertilización de cultivos sobre suelo, se puede necesitar un solo tanque. Para cultivo hidropónicos la mejor opción es emplear tres tanques para la aplicación de todos los nutrientes.

b) Soluciones incompletas: en los sistemas de cultivo en suelo, es habitual aplicar P como fertilizante en fondo antes de la siembra para evitar el alto coste de las formas solubles de P y la alta probabilidad de precipitación de P en el sistema. En este caso, sólo se aplican generalmente N y K a través del fertirriego. Sólo se requiere un depósito ya que las combinaciones de N y K no son problemáticas. También es posible aplicar cada nutriente primario en diferentes fertirriegos, con un depósito para cada nutriente primario. Esta última solución reduce el riesgo de precipitación en el tanque o en el sistema de riego.

   Cualquiera que sea el tipo de tanque de fertirriego, su tamaño y la cantidad total de fertilizante disuelto se determina por la solubilidad del fertilizante menos soluble.

27.4. ABONOS PARA EL FERTIRRIEGO

Las principales propiedades consideradas en los fertilizantes para fertirriego son la concentración de nutrientes, la pureza, la solubilidad, el efecto sobre el pH y la

compatibilidad. Además la conductividad eléctrica en la solución aplicada no debe exceder de ciertos umbrales y el pH debe estar en el rango de 5.0 a 6.5. En ese rango de pH los nutrientes están disponibles para su absorción por las raíces. Por encima de este intervalo se pueden formar precipitados (p.ej. compuestos de Ca con fosfato), mientras que por debajo el sistema radical puede ser dañado por una solución de fertirriego excesivamente ácida. Las principales propiedades de los fertilizantes más ampliamente utilizados en fertirriego se muestran en la Tabla 27.1.

Tabla 27.1. Propiedades de los principales fertilizantes utilizados en fertirriego. Se incluyen los fertilizantes sólidos más simples con la excepción de los ácidos que se administran como líquidos.

		Peso eq	Solubilidad 20ºC	Concentración (% peso)					
		g/eq	kg/m^3	N	P	K	S	Ca	Mg
Fosfato monoamónico	$NH_4 H_2 PO_4$	115	626	12	22.6	0	1.5	1.5	0
Fosfato monopotásico	$K H_2 PO_4$	136.1	200	0	22.8	28.7	0	0	0
Nitrato amónico	$NH_4 NO_3$	80	1920	34	0	0	0	0	0
Sulfato amónico	$(NH_4)_2 SO_4$	66.1	730	21	0	0	24	0	0
Nitrato cálcico (hidratado)	$Ca(NO_3)_2 .4H_2O$	118	1220	12	0	0	0	17	0
Nitrato potásico	$K NO_3$	101.1	316	13.4	0	39	0.2	0	0
Nitrato de magnesio (hidratado)	$Mg (NO_3)_2.6H_2O$	128.2	1330	10.9	0	0	0	0	9.5
Cloruro potásico	K Cl	74.6	340	0	0	49.8	0	0	0
Sulfato potásico	$K_2 S0_4$	87.2	110	0	0	41.5	16	0	0
Sulfato de magnesio (hidratado)	$Mg SO_4.7H_2O$	123.2	710	0	0	0	13	0	9.9
Urea	$CO (NH_2)_2$	60.1	1033	46	0	0	0	0	0
Acido fosfórico 55%, 1.38 g/cm^3	$H_3 PO_4$	98	5480	0	17.4	0	0	0	0
Acido fosfórico 75%, 1.58 g/cm^3	$H_3 PO_4$	98	5480	0	23.7	0	0	0	0
Acido nítrico 57%, 1.35 g/cm^3	$NO_3 H$	63	10000	12.5	0	0	0	0	0
Nitrato cálcico	$Ca (NO_3)_2$	82	1212	17	0	0	0	24	0
Nitrato de magnesio	$Mg (NO_3)_2$	74.1	770	18.9	0	0	0	0	16.4

La forma en la que se suministra el nitrógeno es un aspecto crítico en fertirriego. El nitrógeno no puede ser suministrado exclusivamente como NH_4^+ porque a) es fitotóxico a alta concentración en los medios de cultivo y b) puede promover una disminución de la absorción de otros cationes tales como Ca^{2+}, Mg^{2+} y K^+. Esto es causado por la competencia por los mecanismos de absorción y por la disminución del potencial electroquímico a través de las membranas plasmáticas, que induce un aumento de la excreción de protones por las células de la raíz para mantener el gradiente electroquímico. Por contra, cuando se proporciona el N sólo como NO_3^-, su absorción promueve una alcalinización del apoplasto de la raíz y de la rizosfera debido al mecanismo de absorción de nitrato (simporte con protones) que puede afectar negativamente a la absorción de algunos nutrientes tales como Fe. Por lo tanto, se recomienda aplicar el N como 80-90% de nitrato y 10-20% de amonio para mantener el pH de la rizosfera en valores óptimos aprovechando al mismo tiempo el efecto de la acidificación del NH_4^+. La aplicación de N sólo como NO_3^- podría ser una buena opción para fertirriego en suelos ácidos.

La temperatura es el principal factor que afecta a la solubilidad de los fertilizantes, que es proporcional a la temperatura. Por lo tanto, la concentración máxima de fertilizantes en una solución se determina por la temperatura mínima en el tanque. La disolución de los fertilizantes es generalmente una reacción endotérmica que disminuye la temperatura de la solución. El efecto es importante para la urea y nitratos (de amonio, calcio y potasio). Sin embargo, la dilución de ácido fosfórico es una reacción exotérmica que puede ser utilizada para compensar el efecto de las reacciones endotérmicas aumentando así la solubilidad del fertilizante añadido después.

Los productos más utilizados son el nitrato (calcio, amonio, potasio) y cloruro de potasio, que son compuestos muy solubles. Para garantizar el requisito de alta pureza y alta solubilidad la industria de fertilizantes produce fertilizantes sólidos específicos para fertirriego. También existen soluciones comerciales (p.ej. solución de N-20, nitrato de calcio, ácido nítrico, ácido fosfórico, polifosfatos de amonio, diversos complejos, microelementos). También se producen fertilizantes sólidos compuestos y soluciones de fertilizante líquido compuesto que se presentan en una amplia gama de relaciones de N:P:K, con o sin micronutrientes. Los fertilizantes compuestos líquidos tienen una concentración de nutrientes baja debido a las limitaciones de solubilidad.

El uso de fertilizantes incompatibles o la interacción del fertilizante con el agua de riego, especialmente si se trata de agua dura y/o alcalina, pueden causar la formación de precipitados en el tanque de fertilización y la obstrucción de goteros y filtros. Estos problemas pueden evitarse mediante una elección adecuada de los fertilizantes y una gestión adecuada de la red de riego que debe incluir la realización de lavados y el uso de soluciones de fertilizante acidificados.

Las principales incompatibilidades entre los fertilizantes en fertirriego son las que implican el riesgo de precipitación de compuestos de Ca y Mg, tales como:

Nitrato de calcio en combinación con fosfatos o sulfatos conduce a precipitados de sulfato de calcio o fosfato de calcio.

El fosfato amónico en combinación con sulfato de magnesio conduce a fosfato de magnesio (precipitado).

La aplicación de micronutrientes debería tener en cuenta la estabilidad de las formas en las que se aplican, por lo general quelatos, que se ve afectada por el pH y por la presencia de otros cationes en alta concentración, como Ca. Si se aplican Fe y P en soluciones ácidas pueden precipitar fosfatos de Fe.

27.5. CALIDAD DEL AGUA PARA FERTIRRIEGO

Las principales sales en el agua son cloruros, sulfatos, carbonatos y bicarbonatos de Ca, Mg, Na y K. Algunas aguas pueden contener otros iones (nitratos, fosfatos, amonio, etc.) y ciertos metales (hierro, manganeso, zinc, plomo, etc.) que pueden ser tóxicos (Tabla 27.2). Un análisis de laboratorio estándar de agua de riego incluye los principales cationes (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+} y K^{+}) y aniones (Cl^{-}, SO_4^{2-}, CO_3^{2-}, HCO_3^{-}). El boro también puede determinarse debido a su alta toxicidad, incluso en concentraciones muy pequeñas. La concentración de nitratos (forma de N dominante en agua) debe medirse también para tenerla en cuenta en el balance de N para estimar la necesidad de N del cultivo.

Tabla 27.2. Principales interacciones entre iones a considerar en fertirriego.

Ión	Toxicidad	Precipita con	Reduce la absorción de	Favorece la absorción de
Ca^{2+}	No	SO_4^{-}, HCO_3^{-}, $H_2PO_4^{-}$		
Mg^{2+}	No	$H_2PO_4^{-}$	K^{+}*	
Na^{+}	Yes			
Cl^{-}	Yes		NO_3^{-}, $H_2PO_4^{-}$	
$SO_4^{=}$	Yes	Ca^{2+}		Na^{+}

* Este efecto antagonista podría ser más evidente con fertirriego que en fertilización convencional, ya que el primero mantiene una mayor concentración de Mg y K en la solución del suelo.

El problema más común es la presencia de bicarbonato, que se combina con Ca y Mg y puede precipitar en función del pH. Las aguas con alto contenido de Ca con pH alcalino causarán problemas con más de 2 meq bicarbonato/L. Para corregir estos problemas y llevar el pH al intervalo deseado (5.0-6.5) se añade un ácido, dejando alrededor de 0.5 meq/L de bicarbonato no neutralizado.

Otro posible problema está relacionado con los fertilizantes fosfatados. En aguas con mucho Ca o Mg, cuando el pH es alto, se forman fosfatos de Ca y Mg, que son insolubles. Estos precipitados se depositan en las paredes de las tuberías y en los emisores, causando su obstrucción. La disponibilidad de P para las plantas también se reduce.

Por tanto, se recomienda el uso de fertilizantes de P ácidos (fosfato mono-amónico o ácido fosfórico) para reducir el riesgo de precipitación de fosfatos de Ca y Mg.

En cualquier caso, los fertilizantes disueltos que quedan en los emisores al final del fertirriego pueden precipitar cuando el agua se evapora. Para evitar esto la duración del fertirriego debe ser más corta que la del riego lo que permite el lavado con agua al final del riego. Para disolver los precipitados que quedan y desatascar los goteros podemos usar la reacción ácida de algunos fertilizantes y/o la inyección de una solución ácida que también elimina bacterias y algas. Después de inyectar el ácido el sistema de inyección y el de riego deben ser lavados cuidadosamente con agua de riego adicional.

Otros problemas de calidad del agua de riego pueden ser las siguientes:

a) La presencia de algas (balsas de riego) o bacterias (aguas subterráneas, balsas) requieren tratamientos adicionales que pueden ser realizados con cloro, sulfato de cobre (5 ppm) o permanganato potásico (2 ppm).

b) Las aguas subterráneas ferruginosas producen depósitos de óxido de Fe o Mn cuando se oxidan. Requieren primero un pre-tratamiento tal como la aireación o la quelación, y después un filtrado para retener los óxidos precipitados.

27.6. CÁLCULO DE LAS SOLUCIONES MADRE

En los sistemas de fertirriego con dosificación proporcional, en el cabezal de riego se prepara una solución concentrada conocida como solución madre. El fertirriego se programa para diluir la solución madre en el agua de riego en las proporciones de 1:100 hasta 1:1000, mientras se controla el pH y la EC. Esto resulta en la solución de fertilizante que, después de ser filtrada, alcanzará los emisores. Esta solución reacciona con el sustrato y el resultado es la solución nutritiva final que es absorbida por las raíces.

La conductividad eléctrica puede calcularse aproximadamente como una función de la concentración de cationes (CC, en meq/L) o aniones o como una función de la concentración de sal (sólidos disueltos totales o TDS, en g/L):

$$\mathrm{EC\ (dS/m)} = \mathrm{CC}/10 = \mathrm{TDS}/0.64 \tag{27.1}$$

Para el cálculo de la solución madre podríamos enfrentarnos a diferentes situaciones:

a) Sabemos la cantidad total de N y K para añadir a la cantidad total de riego. Por lo tanto, se deduce la concentración del nutriente, que se convierte en cantidad de abono a añadir usando las concentraciones indicadas en la Tabla 27.1. No se debe exceder la solubilidad máxima (p.ej. tomar 80% de ésta), en particular si se esperan oscilaciones de temperatura. En la solución de fertilizante final, la solución madre se diluye M veces, por lo que la cantidad de fertilizante a añadir a la solución madre (kg de fertilizante/m^3) será:

$$M \cdot \frac{dosis\ de\ nutriente\ \left(\frac{kg\ nutriente}{ha}\right)}{riego\ \left(\frac{m^3}{ha}\right) \cdot concentración\ \left(\frac{kg\ nutriente}{kg\ abono}\right)}$$

b) Conocemos la concentración ideal de cada nutriente (Ne, Pe, Ke) en meq/L y queremos determinar la cantidad de fertilizantes que hay que añadir a un tanque, teniendo en cuenta que la solución madre se diluirá M veces.

b.1) Sin corrección de la acidez. En el caso más simple tenemos agua blanda con menos de 0.5 meq bicarbonato/L, por lo que no es necesaria la corrección del pH. En hidroponía, el bicarbonato disuelto podría ser la fuente de C para los microorganismos nitrificantes autótrofos; por tanto, para garantizar las condiciones para una rápida nitrificación debemos utilizar una baja relación NH_4^+/NO_3^-.

Partimos del requerimiento de fertilizante de P, ya que a menudo es el elemento de menor concentración. Vamos a aplicar P como fosfato monoamónico (MAP) o fosfato monopotásico para cubrir las necesidades. Las necesidades restantes de N (y/o K) se completarán con nitrato potásico, nitrato amónico y/o sulfato potásico.

Ejemplo 27.1.

La solución ideal para un cultivo dado es 4-1-2 meq/L. La solución madre se diluye 400 veces.

Con fosfato monoamónico (MAP):

$$P: 1\ meq\ P/L \cdot 115\ mg\ MAP\ meq\ P^{-1} \cdot 10^{-3}\ g\ mg^{-1} \cdot 10^{3}\ L\ m^{-3} = 115\ g\ MAP\ m^{-3}$$

Esta cantidad también contiene 1 meq/L de NH_4^+, que se descuenta de la concentración de N requerida, por lo que todavía se necesita agregar 3 meq N/L que puede conseguirse utilizando 1.5 mmol/L de nitrato amónico, AN (ya que cada mol proporciona 2 equivalentes de N).

$$1.5\ mmol\ AN/L \cdot 80\ mg\ AN\ mmol\ AN^{-1} \cdot 10^{-3}\ g\ mg^{-1} \cdot 10^{3}\ L\ m^{-3} = 120\ g\ AN\ m^{-3}$$

Finalmente satisfacemos el requisito de K utilizando sulfato de potasio (PS):

$$2\ meq\ PS/L \cdot 87.2\ mg\ PS\ meq\ PS^{-1} \cdot 10^{-3}\ g\ mg^{-1} \cdot 10^{3}\ L\ m^{-3} = 174.4\ g\ PS\ m^{-3}$$

Las concentraciones en la solución madre se obtienen multiplicando las concentraciones antes calculadas por el factor de dilución (400):

MAP	46 kg m^{-3}
NO_3NH_4	48 kg m^{-3}
SO_4K_2	69.8 kg m^{-3}

Hay que comprobar que las concentraciones en la solución madre no superan la solubilidad de los fertilizantes utilizados (Tabla 27.1).

Otras posibles soluciones madre podrían ser:

Fosfato mono potásico	54.4 kg m^{-3}
NO_3K	40.4 kg m^{-3}
NO_3NH_4	48.0 kg m^{-3}
O:	
Fosfato mono potásico	54.44 kg m^{-3}
SO_4K_2	34.88 kg m^{-3}
NO_3NH_4	64.00 kg m^{-3}

b.2) Agua con más de 0.5 meq HCO_3^-/L: el pH tiene que ser corregido. En estas condiciones, el bicarbonato disuelto no es restrictivo para la nitrificación por lo que la relación amonio/nitrato no importa.

Se utiliza un ácido para neutralizar el bicarbonato dejando sólo 0.5 meq/L sin neutralizar. A continuación, el procedimiento es similar al explicado en el caso anterior teniendo en cuenta los nutrientes añadidos con el ácido.

Ejemplo 27.1.

La solución ideal es 4-1-2 mEq/L. El agua tiene 3.5 meq/L de bicarbonato. La dilución es 400 veces. Corrección con ácido fosfórico al 55% (densidad de 1.38 g cm^{-3}).

Para neutralizar 3.0 meq/L de bicarbonato necesitamos 3.0 meq/L de protones que pueden ser suministrados por 1 mmol/L de PO_4H_3 puro.

1 mmol PO_4H_3/L· 98 mg PO_4H_3 mmol $PO_4H_3^{-1}$·10^{-3} g mg^{-1}·10^3 L m^{-3}=120 g PO_4H_3 m^{-3}

120 g PO_4H_3 m^{-3}· 1 g solución/0.55 g PO_4H_3·1 cm^3 solución/1.38 g solución = 158 cm^3 m^{-3} (ácido fosfórico 55%)

También hemos cubierto la necesidad de P (1 meq/L).

Ahora vamos a cubrir la necesidad de K utilizando sulfato de potasio (PS):

2 meqK/L · 87.2 mg PS meq K^{-1}· 10^{-3} g mg^{-1}·10^3 L m^{-3} = 174.4 g PS m^{-3}

Para el suministro de 4 meq/L de N con nitrato de amonio, ya que cada mol da 2 equivalentes de N, aplicaremos 2.0 mmol AN/L:

2.0 mmol AN/L · 80 mg AN mmol AN^{-1}· 10^{-3} g mg^{-1}·10^3 L m^{-3} = 160 g AN m^{-3}

A continuación, aplicamos el factor de dilución (400) y por lo tanto, llegamos a la siguiente solución madre:

Acido fosfórico 55%	63.2 L m^{-3}
SO_4K_2	69.76 kg m^{-3}
NO_3NH_4	64.00 kg m^{-3}

Ejemplo 27.1.

La solución ideal es 4-1-2 meq/L. El agua tiene 3.5 meq/L de bicarbonato. La dilución es 400 veces. Corrección con ácido nítrico al 57% (densidad de 1.35 g cm^{-3}).

Para neutralizar 3.0 meq/L de bicarbonato necesitamos 3.0 meq/L de protones que pueden ser suministrados por 3 mmol/L de NO_3H puro.

3 mmol /L ·63 mg $mmol^{-1}$· 10^{-3} g mg^{-1}·10^3 L m^{-3} = 189 g m^{-3} ácido puro

189 g NO_3H m^{-3} · 1 g solución/0.57 g NO_3H· 1 cm^3 solución/1.35 g solución = 245.6 cm^3 m^{-3} (ácido nítrico 57%)

El cual también contiene 3 meq/L de nitrato; por lo tanto necesitamos añadir 1 meq/L de N para completar 4 meq N/L.

Aplicamos P como MAP (fosfato mono amónico):

1 meq P/L · 115 mg MAP meq P^{-1}· 10^{-3} g mg^{-1}· 10^3 L m^{-3} = 115 g MAP m^{-3}

Que contiene también 1 meq/L de amonio, por lo que así completamos las necesidades de N.

Finalmente aplicamos K como sulfato potásico:

2 meq K /L · 87.2 mg PS meq K^{-1}· 10^{-3} g mg^{-1}· 10^3 L m^{-3} = 174.4 g PS m^{-3}

Aplicamos el factor de dilución (400) y llegamos a la siguiente solución madre:

NO_3H 57%	98.24 L m^{-3}
MAP	46 kg m^{-3}
SO_4K_2	69.76 kg m^{-3}

27.7. CONTROL DEL FERTIRRIEGO

La conductividad eléctrica (EC) en los emisores puede estimarse a partir del análisis de agua y la cantidad de fertilizantes aplicados. En cualquier caso, la EC y el pH pueden medirse en emisores para comprobar la exactitud de los cálculos. En sistemas que permitan medir el volumen de lixiviados y las características (pH, EC) de las soluciones de entrada y salida, podemos comprobar si el programa de fertirriego es correcto, para modificarlo si es necesario. Esto serviría también para la automatización del programa de fertirriego.

En primer lugar fijamos la necesidad de lavado (LR) en función de la EC de la solución nutritiva. Los valores observados de fracción de lavado deben ser similares a LR. De lo contrario el volumen de riego debe ser ajustado.

Una concentración muy baja de nitrato en el agua drenaje puede indicar que el N es limitante, por lo que su concentración se debe aumentar en la solución nutritiva.

Un valor más alto de EC y/o cloro en el drenaje que en la solución aplicada indica una acumulación de sales en la zona radicular. Si la diferencia entre la EC de drena-

je y la de riego es mayor que 0.4-0.5 dS/m, y/o si la concentración de cloro en la solución de drenaje es más alta que la de la solución de entrada y por encima de 50 mg/L, debe aplicarse un riego sin fertilizantes para lavar las sales.

El pH óptimo de la solución de riego es 6-6.5 y se puede ajustar por la inyección de ácido. El pH del agua de drenaje no debe exceder de 8.5. De lo contrario la relación NH_4^+/NO_3^- de la solución de nutrientes se debe aumentar hasta 0.25.

27.8. CÁLCULO DE SOLUCIONES NUTRITIVAS COMPLETAS

En el caso de cultivos hidropónicos necesitamos soluciones completas que incluyen micronutrientes. Los macronutrientes que se añaden se determinan teniendo en cuenta la composición del agua de riego y la composición de la solución ideal. Una solución de nutrientes de referencia ampliamente utilizada es el propuesta por Hoagland y Arnon. El procedimiento de cálculo se muestra en un ejemplo en la Tabla 27.3. La Tabla 27.4 muestra la composición de las soluciones recomendadas para diferentes especies.

Tabla 27.3. Ejemplo de preparación de la solución de Hoagland-Arnon. El valor negativo para la adición de bicarbonato indica la necesidad de aplicar 2.0 meq/L de un nutriente (p.ej. N) como ácido.

El procedimiento para llenar la tabla es el siguiente:

- Añadir protones como HNO_3
- Rellenar la fila de NO_3^- en el orden Ca^{2+}, NH_4^+, K^+
- Añadir P como KH_2PO_4
- Completar K^+ usando SO_4K_2
- Añadir Mg^{2+} como SO_4Mg

Una vez que se llena la tabla convertimos cada celda en peso de abono para agregar las cantidades indicadas en la tercera parte de la Tabla. En este ejemplo, la solución resultante tiene un número de cationes (o aniones) de 20.5 meq/L, por lo que la EC prevista será de 2.05 dS/m.

	NO_3^-	$H_2PO_4^-$	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	NH_4^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+
Agua	0	0	2	2.5	1	0	0	2	2	1.5
Ideal	14	1	4	0	0	1	6	8	4	0
Añadir	14	1	2	-2	0	1	6	6	2	0
Solución	14	1	4	0.5	1	1	6	8	4	1.5

	NH_4^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	H^+	Total
NO_3^-	1	5	6		2	14
$H_2PO_4^-$		1				1
SO_4^{2-}				2		2
Total	1	6	6	2	2	17

Fertilizante	meq/L	g/mol	g m^{-3}
NO_3NH_4	1	80	80
NO_3K	5	101.1	505.5
$(NO_3)_2Ca.4H_2O$	6	118	708
NO_3H	2	63	126
KH_2PO_4	1	136.1	136.1
$SO_4Mg.7H_2O$	2	123.2	246.4

Tabla 27.4. Algunos ejemplos de concentraciones recomendadas (meq/L) de macronutrientes en la solución de nutrientes para diferentes especies. Adaptado de Cadahía C (2005) Fertirrigación. Cultivos hortícolas, frutales y ornamentales. Mundi-Prensa, Madrid

	NO_3^-	NH_4^+	$H_2PO_4^-$	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	SO_4^{2-}
Tomate y pimiento (hidropónico)	15		2	9	10	3	5
Tomate y pimiento (en suelo)	8.0-12.0	0.9-1.4	1-1.5	4.0-6.0	4.8-7.0		
Melón (en substrato)	6.5-11.5	0.7-1.3	1.2	4.0-7.5	3.5-6.5		
Melón (en suelo) *	9	0.8	-	7	4.5		
Fresa *	7	3.5	1	4.5			
Judía	9		1	3.3	6.6	2	2
Pepino	10.5	1	1	5	7.5	2	2
Lechuga, endivia	19	1.2	2	9.0-11	9.0-10	2.0-3.0	2.25
Olivo	1.4-2.75	0.6-1.25	1	2.0-4.0			2
Cítricos	4-5.5	0.5	0.5	1-1.5	2		
Vid	2.5-5	0.5-1	1	3.0-6.0			

* Suplementado con P en presiembra.

La necesidad de la adición de micronutrientes es cada vez más frecuente ya que los rendimientos han aumentado lo que aumenta el uso de micronutrientes, los fertilizantes usados son más puros y, por tanto contienen menos micronutrientes y también porque el uso de estiércol se ha reducido. La disponibilidad de micronutrientes por lo general aumenta a medida que el contenido de materia orgánica del suelo o sustrato aumenta y se reduce cuando se usan aguas duras o alcalinas para el riego. En cualquier caso, hay que tener cuidado porque los micronutrientes pueden llegar a ser tóxicos en exceso (Tabla 27.5). En suelos y sustratos, los micronutrientes metálicos (Fe, Mn, Cu, Zn, Ni), se encuentran generalmente como óxidos e hidróxidos, de baja solubilidad a pH alto. El boro y el molibdeno, cuyas concentraciones son generalmente inferiores a las de micronutrientes metálicos, son más solubles y pueden estar presentes en el agua de riego o fertilizantes orgánicos. El cloro es también un micronutriente pero rara vez es deficitario y puede ser tóxico en una concentración elevada.

Tabla 27.5. Concentración admisible de varios elementos en el agua de riego.

	A largo plazo	**Corto plazo**	
	mg/L	**mg/L**	**Comentarios**
Aluminio (Al)	5	20	Puede convertir los suelos ácidos en inadecuados para el cultivo. Precipita con pH = 5.5-8.0 lo que elimina la toxicidad
Arsénico (As)	0.1	2	Toxicidad variable: 12 mg/L (pasto sudán) – 0.05 mg/L (arroz)
Berilio (Be)	0.1	0.5	Toxicidad variable: 5 mg/L (col) – 0.5 mg/L (haba)
Boro (B)	0.75	2	Tóxico para las especies sensibles (p.ej.,cítricos) a 1 mg/L. Las gramíneas son tolerantes con 2-10 mg/L
Cadmio (Cd)	0.01	0.05	Tóxico para judía, remolacha, rábano, con 0.1 mg/L
Cromo (Cr)	0.1	1	Escasa información. Se recomienda precaución
Cobalto (Co)	0.05	5	Tóxico para tomate con 0.1 mg/L. Se inactiva en suelos neutros y alcalinos
Cobre (Cu)	0.2	5	Toxicidad variable: 0.1 a 1.0 mg/L
Flúor (F)	1	15	Se inactiva en suelos neutros y alcalinos
Hierro (Fe)	5	20	No es tóxico en suelos bien aireados. Induce la acidificación y las pérdidas de P y Mo
Plomo (Pb)	5	10	Puede inhibir el crecimiento celular en alta concentración

Litio (Li)	2.5	2.5	La mayoría de los cultivos son tolerantes hasta 5 mg/L a excepción de los cítricos (0.075 mg /L). Se mueve en el suelo
Manganeso (Mg)	0.2	10	Toxicidad variable en suelos ácidos
Molibdeno (Mo)	0.01	0.05	No es tóxico para las plantas en general. Puede ser tóxico para el ganado cuando los pastos crecen en suelos ricos
Níquel (Ni)	0.2	2	Tóxico para algunas especies a 0.5-1.0 mg/L. Menor toxicidad en suelos neutros y alcalinos
Selenio (Se)	0.02	0.02	Tóxico para las plantas a baja concentración. Puede ser tóxico para el ganado cuando los pastos crecen en suelos con baja concentración
Vanadio (V)	0.1	1	Tóxico para muchas especies a baja concentración
Zinc (Zn)	2	10	Tóxico para muchas especies. La toxicidad se reduce cuando el pH> 6 y en suelos arcillosos y orgánicos

Los micronutrientes se añaden como quelatos o sales que se pueden aplicar individualmente o como soluciones preparadas. Para algunas especies se han determinado las concentraciones óptimas de micronutrientes en la solución de nutrientes (Tabla 27.6). Algunos autores recomiendan añadir todos los micronutrientes metálicos como quelatos aunque hay algunas sales inorgánicas solubles disponibles que se pueden utilizar (p.ej., $CuSO_4$), pero por lo general son menos eficaces en el suministro de nutrientes disponibles para las plantas debido a la oxidación en el suelo, en particular en el caso del Fe. En general las sales inorgánicas, tales como los sulfatos, son la mejor opción para aplicaciones foliares. La Tabla 27.7 muestra los productos más utilizados.

Tabla 27.6. Concentraciones recomendadas (mg/L) de micronutrientes en la solución nutritiva. Adaptado de Cadahía C (2005) Fertirrigación. Cultivos hortícolas, frutales y ornamentales. Mundi-Prensa, Madrid

	Mn	Fe	B	Mo	Cu	Zn
Olivo, vid, cítricos	0.5-1	1-1.4	1-1.1	0.01-0.02	0.05-0.8	0.05-0.2
Tomate, pimiento, berenjena	0.5-1	0.8-2	0.3-0.5	0.05	0.05-0.1	0.03-0.1
Fresa, judía, pepino	0.5	1	0.3-0.5	0.05-0.1	0.1-0.2	0.1-0.2
Lechuga, endivia	0.3-0.5	2.2	0.32	0.05	0.05	0.3

Tabla 27.7. Productos de uso común para la corrección de la deficiencia de micronutrientes. Hay que señalar que para la corrección de clorosis férrica en suelos calcáreos la mayor parte del Fe presente en EDDHA-Fe debería ser orto-orto. Todos los productos son solubles en agua, excepto los marcados con * (insoluble) o ** (ligeramente soluble).

Elemento	Compuesto	% elemento	Uso preferente
Boro	H_3BO_3	17	
	$Na_2B_4O_7 .5H_2O$	20	
	$Na_2B_4O_7.10H_2O$	11	
	$Ca_2B_6O_{11}. 5H_2O$ (**)	10	
Cobre	$CuSO_4.5H_2O$	25	Foliar
	CuO (*)	50-75	Suelo
Hierro	$FeSO_4.7H_2O$	20	Foliar
	Fe HEDTA	5-9	Suelo
	Fe EDDHA	6	Suelo
Manganeso	$MnSO_4.4H_2O$	24	Foliar
	MnO (*)	41-68	Suelo
	Oxisulfato Mn	30-50	Suelo
Molibdeno	$Na_2 MoO_4.2H_2O$	39	Foliar
	$(NH_4)_2 MoO_4$	49	
	MoO_3	66	Suelo
Zinc	$Zn SO_4.H_2O$	36	Foliar
	Complejo $Zn SO_4 -NH_3$	10-15	
	ZnO (*)	60-78	Suelo
	Oxisulfato Zn	18-50	Suelo
	Zn EDTA	6-14	Suelo

27.9. EJEMPLOS DE PROGRAMAS DE FERTIRRIEGO

Ejemplo 27.1.

Un campo de naranjos tiene una necesidad de fertilizante de N anual de 200 kg N/ha. La cantidad total de riego aplicada es de 500 mm. Vamos a calcular la cantidad de fertilizante que hay añadir a la solución madre (dilución x 200) para satisfacer esas necesidades de N.

Suponemos que queremos aplicar solamente N por lo que descartamos fertilizantes NP y NK, por lo que podemos usar urea y nitrato amónico. También se podrían aplicar otros fertilizantes que contienen azufre, calcio o magnesio, pero se descartan debido a su baja concentración de N.

El agua de riego debe tener una concentración:

$$200 \text{ kg N}/5000 \text{ m}^3 = 0.04 \text{ kg N m}^{-3} = 40 \text{ g N m}^{-3}$$

Las dos alternativas serían:

$40 \text{ g N m}^{-3} / 0.34 = 117.6 \text{ g nitrato amónico m}^{-3}$

$40 \text{ g N m}^{-3} / 0.46 = 87 \text{ g urea m}^{-3}$

Las soluciones madre alternativas para una dilución de 200 tendrían concentraciones de:

$117.6 \text{ g nitrato amónico m}^{-3} \cdot 200 = 23.52 \text{ kg nitrato amónico m}^{-3}$

$87 \text{ g urea m}^{-3} \cdot 200 = 17.4 \text{ kg urea m}^{-3}$

Ejemplo 27.1.

Un huerto de cítricos requiere 200 kg N/ha y 270 kg de K/ha con una aplicación de riego total de 500 mm. Vamos a calcular la solución madre (dilución x 200) para satisfacer esas necesidades de N y K.

Nuestra primera opción es un fertilizante que contiene tanto K como N, el nitrato potásico. Para suministrar 200 kg de N/ha y 270 kg de K/ha, como las concentraciones de N y K son 13.4 y 39%, respectivamente, hay que añadir:

$$270 \text{ kg K/ha} / (0.39 \text{ kg K/kg nitrato potásico}) = 692 \text{ kg nitrato potásico /ha}$$

$$692 \text{ kg nitrato potásico} / 5000 \text{ m}^3 = 138.4 \text{ g nitrato potásico / m}^3$$

Eso contribuye también:

$$692 \text{ kg nitrato potásico /ha} \cdot 0.134 \text{ kg N/ kg nitrato potásico} = 92.8 \text{ kg N/ha}$$

Todavía tenemos que añadir 200-92.8 = 107 kg N/ha

Que son equivalentes a 315 kg de nitrato amónico/ha o 233 kg de urea/ha.

Si elegimos la urea, la concentración en el agua de riego será:

$$233 \text{ kg urea}/5000 \text{ m}^3 = 46.6 \text{ g urea/ m}^3$$

Y la solución madre será:

$$27.68 \text{ kg nitrato potásico m}^{-3} \text{ y } 9.32 \text{ kg urea m}^{-3}$$

Alternativamente podríamos haber utilizado fertilizantes simples (urea y cloruro potásico) y la solución madre sería la siguiente:

21.68 kg cloruro potásico m^{-3} y 17.4 kg urea m^{-3}

Teniendo en cuenta que la solubilidad del cloruro de potasio y de la urea son mucho más altas (Tabla 27.1), las concentraciones podrían ser de un orden de mayor magnitud. Esto implica un mayor factor de dilución (2000) que permitiría un tamaño más pequeño del depósito como se ilustra en el siguiente ejemplo.

Ejemplo 27.6.

Calcular el tamaño mínimo del depósito de fertirriego para el ejemplo anterior teniendo en cuenta que la dosis máxima de riego es 4.5 mm/día y que el fertilizante se añade cada día. Vamos a considerar sólo la opción de usar urea y nitrato potásico.

Las concentraciones requeridas en el agua de riego se calcularon en el Ejemplo 27.5:

138.4 g nitrato potásico/m^3

46.6 g urea/ m^3

Ahora en la Tabla 27.1 se observa que la concentración máxima que se permite en la solución madre (se toma un 80% de la solubilidad) sería:

Urea: 826.4 kg m^{-3}

Nitrato potásico: 252.8 kg m^{-3}

El caso más limitante es el del nitrato potásico que conduce a un factor máximo de dilución de:

252800/138.4 = 1827

La solución madre debe ser:

Urea: 85.138 kg m^{-3}

Nitrato potásico: 252.857 kg m^{-3}

La cantidad de riego a aplicar es de 45 m^3/ha/día, que requiere 24.63 L/ha/día de solución madre. Este es el volumen mínimo requerido para el tanque. Por ejemplo, en una plantación de 10 hectáreas se requeriría un tanque mayor de 246 L.

BIBLIOGRAFÍA

Burt CM, O'Connor C, Ruehr TA (1995) Fertigation. IRTC, Cal Pol St Univ, San Luis Obispo CA

Hagin J, Sneh M, Lowengart-Aycicegi A (2003) Fertigation: Fertilization through irrigation. IPI Res Topics, Int Potash Inst, Bassel, Switzerland

Kafkafi U, Tarchitzky J (2011) Fertigation: A Tool for Efficient Fertilizer and Water Management. Int Fertilizer Ind Assoc (IFA)& Int Potash Inst, Paris

Capítulo 28

La manipulación del ambiente de los cultivos

F.J. VILLALOBOS
L. TESTI
L. MATEOS

RESUMEN:

Los cortavientos son estructuras que reducen la velocidad del viento y pueden afectar a la turbulencia en la zona protegida. La máxima eficacia de protección se obtiene con cortavientos de porosidad media que reducen la velocidad del viento hasta una distancia de 20-25 veces su altura. En el área protegida por un cortavientos las oscilaciones de temperatura aumentan, lo que en algunas zonas puede aumentar el riesgo de heladas y la deposición de rocío.

La temperatura del suelo se puede modificar cambiando su exposición a la radiación, por calentamiento artificial o mediante acolchado. Los acolchados pueden ser naturales (p.ej. residuos de cosecha) o artificiales, sobre todo las películas de plástico. La temperatura del cultivo se puede reducir mediante humedecimiento con aspersores aunque esto sólo es eficaz con alto VPD e implica un uso excesivo de agua. Se pueden aplicar modelos simples del balance de energía para calcular las temperaturas mínima y máxima del cultivo. Se puede conseguir un mayor control ambiental con túneles y con invernaderos que crean un entorno más cálido y protegido del viento y son cada vez más populares en la producción hortícola.

28.1. INTRODUCCIÓN

Existen posibilidades limitadas para modificar el ambiente aéreo de las plantas cultivadas en campo. En este capítulo se discuten estas posibilidades empezando por la protección de los cultivos contra el viento y luego pasamos a las manipulaciones ambientales para modificar la temperatura del suelo o del cultivo.

El principal factor que se puede manipular es el viento que puede ser modificado mediante la colocación de estructuras físicas (vivas o inertes) en los bordes de los campos. Las estructuras pueden formar paredes, llamadas cortavientos, cuyo objetivo principal es reducir la velocidad del viento. La estructura puede estar formada por una o varias hileras de árboles y arbustos (cinturón protector). Otra forma de protección es la que otorga un conjunto de árboles dispersos que no sólo afectan al viento en la zona, sino que tienen además un efecto protector mediante la interceptación de la lluvia. Esta asociación de cultivos y árboles protectores se denomina sistema agroforestal. En estos sistemas los árboles pueden producir madera y/o frutos que contribuyen directamente a los ingresos del agricultor, además de proteger los cultivos.

El uso de cortavientos ha sido una práctica común en los sistemas agrícolas de las regiones con fuertes vientos desde hace mucho tiempo. Un ejemplo sería el de los cortavientos contra el mistral en el valle del Ródano en el sur de Francia. En las Grandes Llanuras de los EE.UU. el uso de cortavientos comenzó tras la década de 1930 para proteger el suelo de la erosión eólica después de un largo período de sequía (Dust Bowl). En la actualidad se utilizan sólo en las regiones donde el viento supone riesgos considerables para la producción agrícola. Debido a que ocupan terreno, los cortavientos se utilizan principalmente en horticultura y fruticultura.

En contraste con sus efectos protectores beneficiosos, los cortavientos también tienen efectos negativos. En primer lugar ocupan parte de la tierra cultivable y reducen la radiación incidente sobre las zonas cultivadas en su proximidad. Si son estructuras vivas pueden competir por agua y nutrientes y pueden servir como refugio para algunas plagas. Pero a pesar de estos inconvenientes, la mayoría de los estudios realizados en zonas de fuertes vientos han demostrado un efecto positivo general de los cortavientos en el rendimiento de los cultivos.

28.2. EFECTOS DEL VIENTO SOBRE LOS CULTIVOS

Los efectos del viento sobre los cultivos y los suelos son diversos:

- Crecimiento: el movimiento de la planta debido al viento puede reducir la tasa de crecimiento del cultivo e incrementar la resistencia mecánica de la planta (tallos más gruesos y cortos, mayor relación raíz/parte aérea). Este fenómeno, llamado tigmomorfogénesis, no requiere un estímulo continuo, sino que puede ser provocado por movimientos infrecuentes.

- Daños mecánicos: la fuerza del viento puede desgarrar las hojas o arrancarlas de la planta. Si el área foliar es densa la abrasión puede ser consecuencia de la

fricción entre hojas y tallos. Además las partículas de suelo transportadas por el viento pueden provocar un daño mecánico indirecto al impactar con las plantas.

- Encamado: es causado por vientos fuertes después de mojar el cultivo por lluvia o riego, lo que aumenta la carga en la planta y el momento de flexión y disminuye la estabilidad de la placa de raíces. El resultado es que los tallos se doblan o se rompen en algún punto cerca de la superficie del suelo y el cultivo se encama, se postra sobre el suelo.
- La evaporación de los cultivos es proporcional a la velocidad del viento cuando los cultivos están bien regados. Por lo tanto los cultivos utilizarán el agua del suelo más rápidamente en las zonas no protegidas por cortavientos.
- Los vientos cálidos y secos pueden causar asurado del grano en los cereales (interrupción definitiva del crecimiento del grano, que queda pequeño y arrugado) durante la fase temprana de llenado del grano.
- La salinización en las zonas costeras puede ocurrir por deriva de las gotas de agua de mar arrastradas por el viento.
- El viento afecta a la variación de la temperatura superficial. Por lo tanto el riesgo de heladas puede aumentar en las áreas protegidas (véase el Capítulo 29).

28.3. LOS CORTAVIENTOS

Los cortavientos son estructuras establecidas para reducir la velocidad del viento y cambiar su dirección. Las barreras pueden estar formadas por plantas (arbustos, árboles o plantas anuales) o estructuras inertes (vallas, muros de cerramiento, mallas de plástico u otras estructuras específicas). Aparte de la reducción de la velocidad del viento, los cortavientos vegetales proporcionan beneficios adicionales, tales como proporcionar refugio a la fauna silvestre, proteger el ganado frente a las inclemencias meteorológicas y actuar como barrera para el sonido y los malos olores. Además algunas operaciones agrícolas se mejoran en las áreas protegidas al conseguir una reducción en la deriva de los pesticidas aplicados y una mayor uniformidad del riego por aspersión y de la aplicación de productos por pulverización. También se crea un mejor ambiente para los trabajadores agrícolas. En algunas áreas, las autoridades ambientales fomentan el establecimiento de cortavientos como un medio para aumentar la biodiversidad y para mejorar el paisaje mediante el desarrollo de políticas específicas que proporcionan incentivos a los agricultores. El aumento de la biodiversidad (especialmente de origen animal) es a menudo beneficioso ya que las aves y algunos insectos a menudo se alimentan de las plagas, lo que ayuda a reducir su impacto. En algunos casos, sin embargo, los cortavientos pueden albergar insectos perjudiciales, de forma que mantienen una población capaz de alimentarse de los cultivos una vez establecidos. La composición de las especies de cortavientos debe ser elegida según criterios ecológicos, y teniendo en cuenta las consideraciones aerodinámicas que se abordan a continuación.

Los cortavientos pueden ser una sola hilera de árboles o arbustos o múltiples hileras (franja cortavientos). Los últimos ofrecen mejores condiciones para la fauna y pueden estar formados por 4-5 hileras de árboles y arbustos alternados. Las especies más altas deben ser ubicadas en el centro de la franja mientras que las especies más bajas pueden ser colocadas a ambos lados. Los árboles caducifolios tienen la desventaja de perder gran parte de su capacidad de protección durante el invierno. Los cultivos anuales altos pueden ser utilizados para proteger los cultivos más bajos.

28.4. EL VIENTO Y LA TURBULENCIA EN LA ZONA PROTEGIDA

La estructura del cortavientos –altura, estructura, densidad, número de hileras, la composición de especies, la longitud, la orientación y la continuidad– determina la efectividad en términos de reducción de la velocidad del viento y alteración del microclima.

La eficacia de un cortavientos depende principalmente de su anchura, su altura y su porosidad. La eficacia se mide como la distancia a sotavento, expresada en número de alturas del cortaviento, en la que se reduce la velocidad del viento en comparación con la zona no protegida.

A barlovento del cortavientos, la velocidad del viento se reduce en una distancia de 2 a 5 veces la altura del cortavientos (2H-5H). En el lado de sotavento, la velocidad del viento se puede reducir hasta 30H (Fig. 28.1).

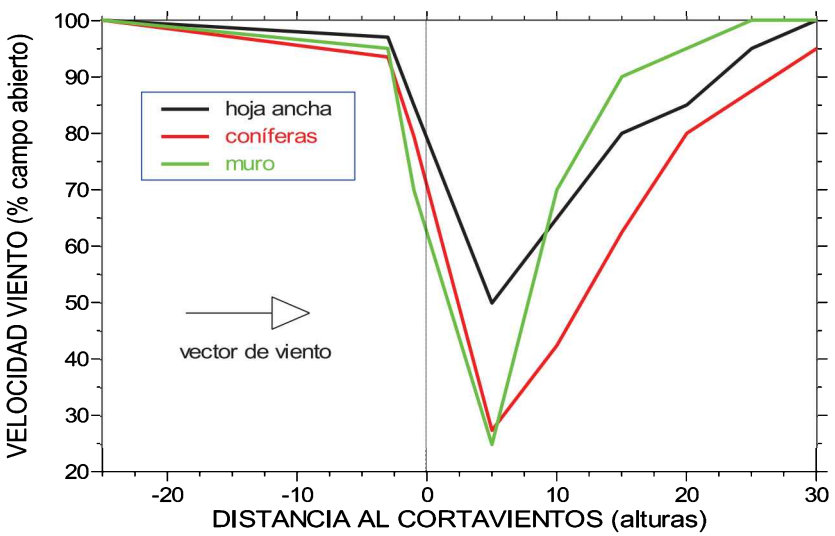


Figura 28.1. Variación de la velocidad del viento (como porcentaje de su valor en la zona no protegida) como función de la distancia al cortavientos, expresada en número de alturas. Los valores negativos y positivos representan los lados de barlovento y sotavento, respectivamente. La porosidad es del 70-75% en el caso de hoja caduca y 20-60% para las coníferas.

La porosidad del cortavientos es la relación entre el volumen de huecos y el volumen total. El viento fluye a través de los huecos del cortavientos, y por lo tanto cuanto menos poroso es el cortavientos, menos viento pasa a través del mismo. A sotavento de un cortavientos muy denso se desarrolla una depresión, lo que provoca un flujo descendente del aire que pasa por encima de la barrera y genera una turbulencia adicional y una reducción de la protección frente al viento. A medida que aumenta la porosidad, también lo hace el flujo que pasa a través de la barrera, y por tanto, no se genera turbulencia adicional y además aumenta la eficacia, aunque la magnitud de la reducción de la velocidad del viento no es tan grande como la conseguida con un cortavientos denso.

Los cortavientos densos (porosidad inferior al 25%) muestran una eficacia (E_w) de 10-15H. Con una permeabilidad alrededor del 50% la eficacia sube a 20-25H (Fig. 28.1), sin adición de turbulencia de gran escala. Estos valores de eficacia varían sin embargo, con diferentes factores tales como la velocidad del viento (E_w es proporcional a la velocidad del viento), la estabilidad atmosférica (E_w es mayor en condiciones inestables), la dirección del viento (E_w es máxima cuando la dirección del viento es normal a la barrera). Incluso cuando el viento sopla paralelo a las barreras se observa algún efecto protector. Los cortavientos con porosidad intermedia (40-60%) suelen ser los más eficaces.

28.5. ESTABLECIMIENTO Y MANTENIMIENTO DE LOS CORTAVIENTOS

Los árboles o arbustos para formar cortavientos deben crecer rápidamente, tener troncos erectos y robustos capaces de resistir las fuerzas del viento y un sistema de raíces con buen anclaje. También deben ser capaces de sobrevivir bajo los estreses abióticos predominantes de la zona (sequía, frío). Entre los cortavientos vegetales, las especies más comúnmente utilizadas son coníferas como el ciprés *(Cupressus spp.),* el abeto *(Picea spp.)* o el pino *(Pinus spp.).* Otros árboles utilizados son los álamos, los eucaliptos, etc. Cada especie y, dentro de cada especie, cada variedad tiene características de adaptación al entorno que determinan qué es lo más conveniente en cada caso. También hay diferencias entre las especies y variedades con respecto a la competencia con el cultivo, que provienen principalmente de los patrones de crecimiento de las raíces que puede ser superficial o bien capaz de explorar los horizontes más profundos del suelo.

La orientación del cortavientos depende de los objetivos de diseño. Las viviendas rurales y los establos por lo general necesitan la protección de los vientos fríos y de la nieve durante el invierno. Los cultivos anuales y las plantaciones frutales por lo general necesitan protección contra los vientos secos y calurosos del verano, o contra las partículas de suelo arrastradas por el viento, en especial durante los períodos críticos de crecimiento. Los cortavientos para el control de la erosión eólica deben ser perpendiculares a los vientos dominantes cuando el suelo está desnudo (invierno y primavera). Para recargar la humedad del suelo con la acumulación de nieve, los cortavientos deben orientarse perpendicularmente a los vientos invernales predominantes.

A pesar de la existencia de una dirección predominante del viento durante los períodos indicados, la dirección del viento puede variar de día a día o durante el día, por lo que el nivel de protección puede ser reducido. Un conjunto de múltiples cortavientos formando líneas paralelas espaciadas 10-15H proporciona un área protegida más grande que un cortavientos único. Si se requiere la protección de varias direcciones del viento se establecería otro conjunto de líneas paralelas, perpendiculares a la primera, lo que resulta en una disposición rectangular de campos protegidos.

A veces tienen que existir huecos en el cortavientos para permitir el acceso a los campos. La longitud ininterrumpida de un cortavientos debe ser al menos 10 veces superior a su altura. Esto se debe a que los huecos en una barrera se convierten en embudos que concentran el flujo del viento, lo que lleva a que la velocidad del viento en la zona protegida pueda ser incluso superior al de zonas no protegidas.

La plantación de un cortavientos sigue las mismas reglas de otras plantaciones, aunque la distancia entre los árboles puede ser menor (p.ej. 3 m entre hileras, 2 m entre árboles en la hilera) y es muy importante conseguir una elevada supervivencia y un crecimiento rápido. Por eso es muy importante reemplazar tan pronto como sea posible cualquier árbol perdido y proporcionar a los árboles jóvenes riego suplementario durante los períodos secos y protegerlos contra los herbívoros (mediante la plantación de plantas espinosas o poniendo cercas de alambre de púas). El control de las malas hierbas es crítico en particular durante los primeros años de la plantación.

A medida que crecen los árboles puede ser necesaria alguna poda para mantener la porosidad requerida, promover el crecimiento vertical y eliminar las ramas dañadas por el viento o las plagas. El aclareo de árboles puede ser necesario para mejorar el crecimiento en diámetro del tronco.

28.6. CAMBIOS DEL MICROCLIMA EN EL ÁREA PROTEGIDA

Tanto la radiación solar como la radiación neta se reducen significativamente en el área sombreada por el cortavientos. El efecto es casi nulo para distancias más allá de 1-2H. El efecto es marginal para las barreras de orientación Norte-Sur, ya que el área sombreada es muy pequeña alrededor del mediodía cuando la radiación es máxima. Una reducción adicional por el sombreado puede ocurrir temprano por la mañana o al final de la tarde, pero se compensa en parte por la reflexión de la radiación desde el cortavientos.

El mayor efecto sobre la radiación se produce en las barreras orientadas de Este a Oeste, en la umbría (zona que mira al Norte, en el hemisferio Norte) del cortavientos, en especial para latitudes altas y los períodos de invierno.

La reducción de la velocidad del viento, y por lo tanto, de la turbulencia en las áreas protegidas tiene varios efectos sobre:

a) Temperatura: durante el día se favorece el calentamiento del suelo (Capítulo 6), que generalmente conduce a mayor temperatura del suelo y del aire por en-

cima. Durante la noche se desarrollan inversiones térmicas pronunciadas que conducen posiblemente a temperaturas mínimas inferiores. Esto explica el aumento del riesgo de heladas en las áreas protegidas.

b) Presión de vapor: tiende a aumentar cerca del cultivo durante el día, cuando las plantas están transpirando, ya que se reduce el intercambio turbulento, sobre todo en días de calma. Durante la noche, la mayor presión de vapor y la temperatura más baja favorece la deposición de rocío en las áreas protegidas. La combinación de una mayor presión de vapor o plantas húmedas por el rocío con una temperatura más alta puede aumentar la incidencia de enfermedades.

c) Evapotranspiración: para los cultivos bien regados la menor velocidad del viento significa una mayor resistencia aerodinámica (Capítulo 4, Capítulo 9) y por lo tanto, una reducción de la ET. Este efecto puede ser compensado en parte por una reducción en la resistencia de la cubierta en algunas especies. Sin embargo, la mejora del ambiente en el área protegida puede aumentar el crecimiento del cultivo y acelerar el agotamiento del agua del suelo. En los cultivos de secano sometidos a estrés hídrico al final del ciclo, el efecto global puede ser una reducción en el índice de cosecha en las áreas protegidas. Sin embargo, los cultivos bien regados alcanzan igual o mayor rendimiento con una reducción de la ET, lo que significa un uso más eficiente del agua.

d) Sensación térmica. Las pérdidas de calor del ganado, de la fauna y de las estructuras (vivienda, invernaderos, etc.) debido al enfriamiento por vientos fríos se reducen a sotavento del cortavientos.

28.7. CORTAVIENTOS DISPERSOS

La presencia de árboles dispersos en el campo reduce la velocidad media del viento, debido al aumento de la rugosidad. La reducción será proporcional a la fracción de área cubierta por los árboles. La principal diferencia de los árboles dispersos y los ubicados en hileras regulares es el grado de interacción (incluyendo la competencia) con el cultivo herbáceo, que es mayor cuando los árboles se encuentran dispersos. En este caso, el árbol también proporciona protección a los cultivos y al suelo del impacto directo de la lluvia. Los efectos negativos son:

- Aumento de la competencia por luz ya que los árboles aislados interceptan proporcionalmente más radiación; también se incrementa la competencia por agua y por nutrientes con el resto de la vegetación.
- Dificultad adicional para las operaciones culturales ya que los árboles se convierten en obstáculos para la maquinaria.
- Mayor coste de establecimiento de árboles aislados, en especial cuando los árboles jóvenes tienen que ser protegidos contra la fauna o el ganado.

28.8. LA IMPORTANCIA DE LA TEMPERATURA DEL SUELO, DEL AIRE Y DEL CULTIVO

Las temperaturas del suelo y del aire influyen en numerosos procesos críticos del cultivo. La germinación de las semillas y la emergencia de las plantas son extremadamente sensibles a la temperatura del suelo. El tiempo desde siembra a emergencia se alarga y el crecimiento de las plántulas es más lento cuando el suelo está frío. La temperatura del cultivo tiene un efecto importante en los procesos críticos de la planta (desarrollo, crecimiento, fotosíntesis) y por lo tanto en la productividad de los cultivos.

La distribución de la raíz también se ve afectada por la temperatura del suelo. En algunas especies el crecimiento de las raíces se limita a las capas superiores cuando el suelo está demasiado frío, mientras que una distribución de la raíz mucho más profunda se observa a temperaturas más altas, lo que mejora la absorción de nutrientes y agua. Otros procesos que responden a la temperatura del suelo son la fijación simbiótica de nitrógeno, la fotosíntesis, el flujo de agua en el sistema suelo-planta (la viscosidad del agua es alta a baja temperatura), la mineralización de la materia orgánica y la respiración del suelo.

En resumen, las temperaturas del suelo y el aire tienen efectos variados sobre los cultivos y su control puede aumentar los rendimientos. Es por ello que a veces se calienta artificialmente el suelo y/o el aire en cultivos de alto valor. Las alternativas para los cultivos al aire libre son limitadas, pero algunas pueden ser muy eficaces para manipular la temperatura del suelo.

28.9. PENDIENTE Y ORIENTACIÓN

La radiación sobre una superficie dada aumenta a medida que el ángulo de incidencia de los rayos solares disminuye, y es máxima cuando el vector de radiación es normal a la superficie. El efecto de la pendiente y la orientación de la superficie será proporcional a la fracción de radiación directa que llega a la superficie, que se encuentra entre 0 (cielo nublado) y 0.85 (atmósfera despejada con ángulo cenital cero). La pendiente y la orientación de una parcela es menos importante cuando el ángulo cenital es grande o pequeño, aunque por diferentes razones. La fracción de radiación directa disminuye a medida que aumenta el ángulo cenital, debido a la trayectoria más larga de atmósfera que los rayos del sol atraviesan para llegar a la Tierra. Por lo tanto, la pendiente y la orientación de una superficie apenas afectarán a la radiación en latitudes altas. Por otro lado, para las latitudes muy bajas el ángulo cenital es tan pequeño que la orientación tiene poco efecto sobre la radiación incidente. El mismo razonamiento se puede aplicar a los cambios estacionales: la pendiente y la orientación son importantes en la primavera o el otoño, pero menos importante en verano (bajo ángulo cenital) y en invierno (alta fracción de radiación difusa).

La Figura 28.2 muestra la temperatura en diferentes puntos de un campo con surcos en dirección Norte-Sur. La temperatura en el surco es más baja que en el lomo.

En los lados del caballón la temperatura es normalmente mayor que en el lomo, con la cara mirando hacia el Este más caliente durante la mañana y la del Oeste más caliente por la tarde.

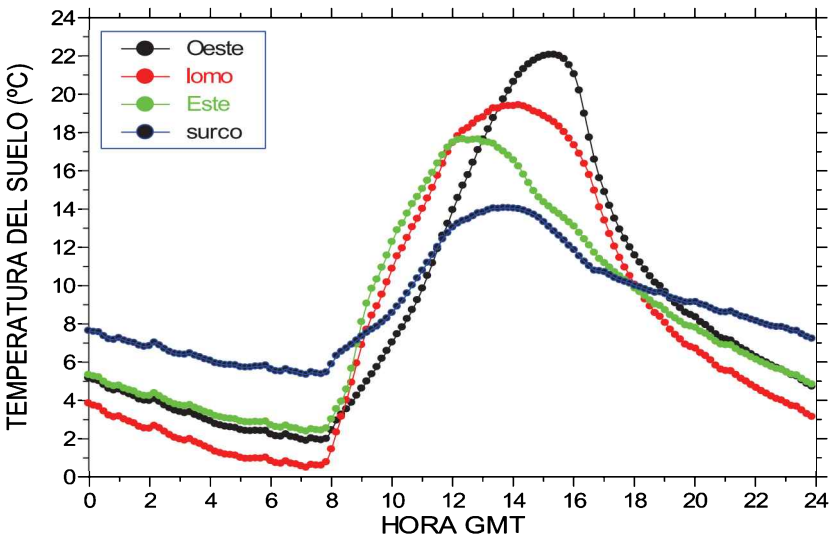


Figura 28.2. Evolución temporal de la temperatura del suelo a 2.5 cm de profundidad en un suelo franco-arenoso asurcado en dirección Norte-Sur en Córdoba (España).

Las superficies orientadas hacia el Norte o hacia el Sur son más frías y más cálidas, respectivamente, en el hemisferio Norte.

28.10. ACOLCHADOS

Un acolchado es una capa de material que cubre el suelo y actua como una barrera al transporte de calor o de agua. Los acolchados sirven además para proteger el suelo contra la erosión y contribuyen al control de malas hierbas. Algunos acolchados comunes son los restos de malas hierbas, la paja y otros residuos de cultivos, acolchados inorgánicos (láminas de plástico, grava, arena) y subproductos industriales (corteza, serrín, etc.).

El efecto de un acolchado en la temperatura del suelo tiene que ser evaluado considerando en primer lugar el posible cambio en la radiación neta. El plástico negro aumentará la radiación neta (albedo más bajo), mientras que la paja la reducirá (mayor albedo). El segundo aspecto a considerar es el transporte de agua. Los acolchados pueden reducir el flujo de agua o incluso suprimirlo (láminas de plástico). Por lo tanto, en muchos casos habrá más energía disponible para calentar el aire (si usamos paja) o el aire y el suelo. Un plástico transparente favorecerá el calentamiento de suelo mucho más que un plástico negro (Fig. 28.3). Este último absorbe

la radiación, pero transmite y refleja poco, por lo que el plástico negro se calienta y puede alcanzar altas temperaturas. Sin embargo, la conducción del calor al suelo está limitado por la capa de aire entre el plástico y la superficie del suelo. El plástico transparente deja pasar la radiación de onda corta, y bloquea muy poco la radiación de onda larga. Por lo tanto, durante la noche, el suelo bajo plástico transparente se enfría igual que el control (suelo desnudo), mientras que el plástico negro mantiene el suelo más caliente debido a la baja transmisividad de radiación de onda larga. La paja transmite poca radiación lo que reduce el calentamiento del suelo durante el día y su enfriamiento durante la noche.

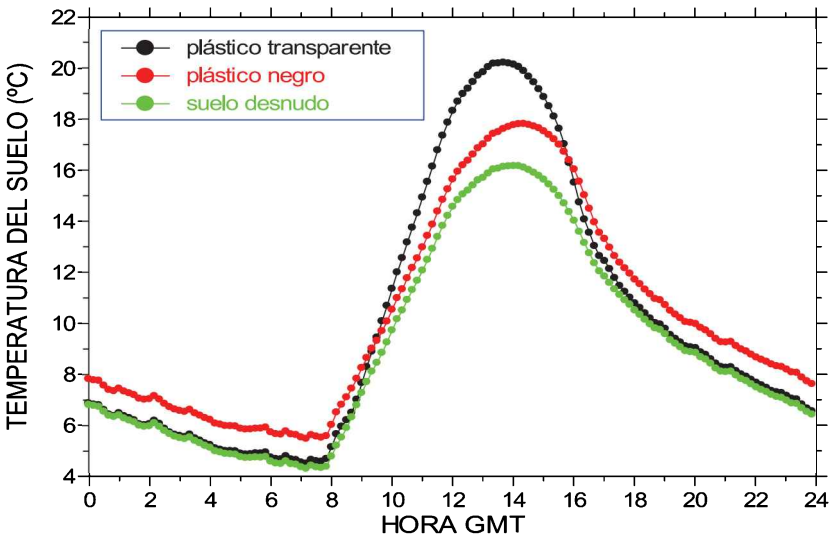


Figura 28.3. Evolución temporal de la temperatura del suelo a 2.5 cm de profundidad bajo láminas de plástico negro o transparente en un suelo franco-arenoso en Córdoba (España).

Las láminas de plástico transparente se utilizan ampliamente en los cultivos hortícolas durante la primavera para aumentar la temperatura del suelo y, por tanto, acelerar el desarrollo de los cultivos para la producción temprana y para reducir la duración del ciclo. La recolección precoz conduce a mejores precios en muchos cultivos hortícolas. Además del efecto sobre la temperatura, se conserva el agua del suelo en la zona superficial, lo que impide la aparición de una costra superficial y mejora las condiciones para la germinación, la emergencia y el crecimiento temprano de las plántulas.

El plástico negro también se utiliza a menudo en los cultivos hortícolas, pero el objetivo principal es el control de malas hierbas. Muchas semillas de malas hierbas van a permanecer en estado latente en la oscuridad y las que germinen morirán rápidamente por la falta de hidratos de carbono. Otra de las ventajas de una cubierta de plástico (válido también para películas transparentes) es impedir el contacto directo de los frutos con el suelo evitando así algunas enfermedades.

La mayoría de las acolchados, y especialmente los de origen orgánico (paja, residuos de cultivos, cubiertas vivas) actúan como aislantes, es decir, amortiguan las oscilaciones de la temperatura del suelo, y por lo tanto mantienen el suelo más fresco cuando se aplican en la primavera (Fig. 28.4) o más caliente si se aplican en verano. Los cultivos sembrados en primavera con acolchado (p.ej. siembra directa con residuos) mostrarán así un desarrollo más lento. El efecto sobre el balance hídrico depende de la distribución de la lluvia: las lluvias frecuentes y ligeras mojarán el acolchado y la mayor parte del agua se evaporará directamente desde el mismo. Las lluvias más abundantes y aisladas se infiltran mejor en el suelo y el acolchado reducirá la evaporación desde el suelo.

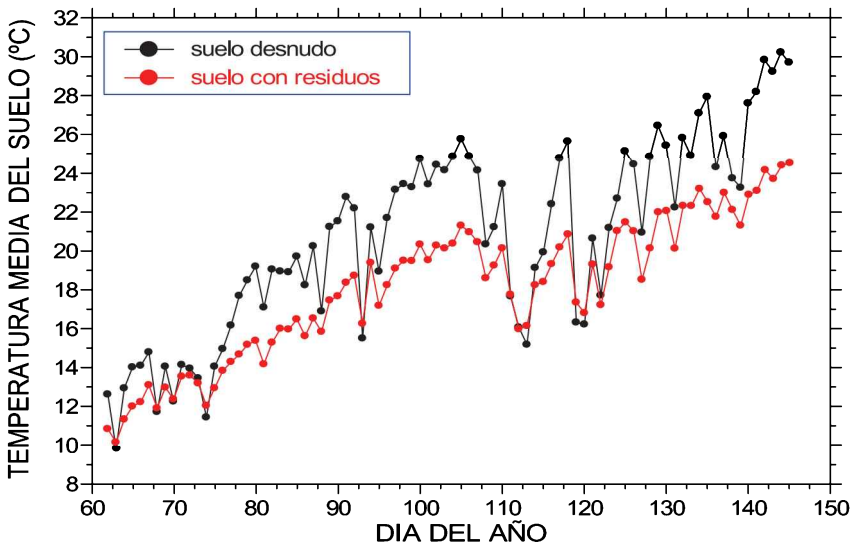


Figura 28.4. Temperatura media diaria en la superficie del suelo para un suelo franco-arenoso en Córdoba (España) en 2011, cubierto con paja o desnudo.

Los acolchados inorgánicos como la arena o la grava tienen excelentes propiedades, ya que no reducen el calentamiento del suelo, mientras que son muy eficaces en la reducción de la evaporación del suelo y el aumento de la infiltración.

28.11. CALENTAMIENTO ARTIFICIAL DEL SUELO

En situaciones muy especiales (semilleros, estadios deportivos, cultivos hortícolas de alto valor) el suelo puede ser calentado mediante cables eléctricos o tuberías con agua caliente. El coste puede ser reducido cuando el agua caliente es un subproducto de operaciones en plantas industriales o refrigeración de centrales eléctricas.

28.12. MODIFICACIÓN DE LA TEMPERATURA DE LA CUBIERTA

Los cortavientos aumentan las oscilaciones de temperatura en el área protegida (véase 28.5). Una alternativa para reducir la temperatura de los cultivos al aire libre es mojar las plantas. Hace algún tiempo, un grupo de investigadores en EE.UU. propuso el uso de riego frecuente para mantener el dosel mojado, y por lo tanto reducir la temperatura del dosel más cerca de su nivel óptimo para la fotosíntesis con el fin de aumentar la productividad.

Usando las ecuaciones para los flujos de calor sensible y calor latente, podemos calcular la diferencia de temperatura entre el cultivo y el aire por encima como:

$$T_c - T_a = \frac{1}{\Delta + \gamma\,(1 + {}^{r_c}/_{r_a})}\left[\frac{\gamma\,(1 + {}^{r_c}/_{r_a})\,(R_n - G) r_a}{\rho\, C_p} - VPD\right] \tag{28.1}$$

Ahora, si el cultivo está mojado, la resistencia de la cubierta es cero, por lo que la temperatura de la cubierta vendrá dada por:

$$T_c^w - T_a = \frac{1}{\Delta + \gamma}\left[\frac{\gamma\ (R_n - G) r_a}{\rho\, C_p} - VPD\right] \tag{28.2}$$

La diferencia de temperatura entre el cultivo seco y húmedo será:

$$\begin{aligned} T_c - T_c^w &= \frac{\gamma\ r_c}{\left[\Delta + \gamma\left(1 + {}^{r_c}/_{r_a}\right)\right](\Delta + \gamma)}\left[\frac{\Delta\,(R_n - G)}{\rho\, C_p} + \frac{VPD}{r_a}\right] \\ &= \left[\frac{\Delta\,(R_n - G) + \rho\, C_p\, {}^{VPD}/_{r_a}}{\Delta + \gamma}\right]\frac{\gamma\ r_c}{\rho\, C_p\left[\Delta + \gamma\left(1 + {}^{r_c}/_{r_a}\right)\right]} \end{aligned} \tag{28.3}$$

El enfriamiento debido al humedecimiento del cultivo es proporcional a la radiación, al VPD y a la resistencia de la cubierta. Téngase en cuenta que el término izquierdo de la ecuación 28.3 es el flujo de calor latente de acuerdo con la ecuación de Penman-Monteith para resistencia de la cubierta cero (LE_w). Así, el incremento de la evaporación cuando el cultivo está mojado puede ser expresado como:

$$\begin{aligned} LE_w - LE &= \left[\frac{\Delta\,(R_n - G) + \rho\, C_p\, {}^{VPD}/_{r_a}}{\Delta + \gamma}\right] - \left[\frac{\Delta\,(R_n - G) + \rho\, C_p\, {}^{VPD}/_{r_a}}{\Delta + \gamma\left(1 + {}^{r_c}/_{r_a}\right)}\right] \\ &= LE\ \frac{\gamma\ {}^{r_c}/_{r_a}}{\Delta + \gamma} \end{aligned} \tag{28.5}$$

Por lo tanto, el aumento relativo de la evaporación debido al humedecimiento del cultivo es proporcional a r_c/r_a. También podemos deducir la reducción de la temperatura de la cubierta por unidad de aumento en el flujo de calor latente:

$$\frac{T_c - T_c^w}{LE_w - LE} = \frac{r_a}{\rho\, C_p} \tag{28.6}$$

De acuerdo con esta ecuación, la eficiencia de refrigeración de un cultivo, tomada como la relación entre disminución de la temperatura e incremento en el uso del agua, será más alta para los cultivos poco rugosos (bajos) y con poco viento.

Ejemplo 27.6.

Cultivo regado con r_c=40 s/m y r_a=40 s/m al mediodía en verano (R_n-G=600 W/m^2) en una zona árida (temperatura del aire 40ºC y humedad relativa 30%). A 40ºC, ρC_p = 1140 J K^{-1} m^{-3}

$e_s = 0.6108 \exp[17.27 \text{ x } 40 / (40+237.3)] = 7.37$ kPa

$e_a = e_s \text{ x } HR/100 = 2.21$kPa

$VPD = 7.37 - 2.21 = 5.16$ kPa

$\Delta = 4098 \cdot 7.37 / (40+237.3)^2 = 0.39$ kPa/K

Si el cultivo está seco, el flujo de calor latente, de acuerdo con la ecuación de Penman-Monteith, es

$$LE = \frac{\Delta\,(R_n - G) + \rho\, C_p\, VPD/r_a}{\Delta + \gamma\,(1 + r_c/r_a)} = \frac{0.39 \cdot 600 + 1140 \cdot 5.16/40}{0.39 + 0.067\,(1 + 40/40)} = 727\ W\ m^{-2}$$

Y la temperatura del cultivo será:

$$T_c = 40 + \frac{1}{0.39 + 0.067\,(1 + 40/40)}\left[\frac{0.067\,(1 + 40/40)\,600 \cdot 40}{1140} - 5.16\right] = 35.5ºC$$

Si mojamos la cubierta, LE será:

$$LE_w = \frac{\Delta\,(R_n - G) + \rho\, C_p\, VPD/r_a}{\Delta + \gamma} = \frac{0.39 \cdot 600 + 1140 \cdot 5.16/40}{0.39 + 0.067} = 834\ W\ m^{-2}$$

Y el enfriamiento conseguido es:

$$T_c - T_c^w = LE_w \frac{\gamma\ r_c}{\rho\, C_p[\Delta + \gamma\,(1 + r_c/r_a)]} = 834\ \frac{0.067 \cdot 40}{1140\,[0.39 + 0.067\,(1 + 40/40)]} = 3.7\ K$$

Por lo que la temperatura del cultivo mojado sería 31.8ºC.

Aparte de aumentar el consumo de agua de los cultivos, el humedecimiento frecuente puede tener efectos adversos como favorecer algunas enfermedades y reducir la absorción de nutrientes por el cultivo (menos agua que fluye desde el suelo a través de la planta).

28.13. TEMPERATURA MÍNIMA DEL CULTIVO

La temperatura del aire se mide de forma rutinaria en las estaciones meteorológicas con sensores protegidos y a una altura estándar (p.ej. 1.5 m). Sin embargo, la temperatura real del cultivo (T_c) suele diferir de ese valor (Capítulo 5). Los principales factores que determinan la diferencia entre la temperatura del aire en la estación meteorológica (T_{aw}) y T_c son la radiación neta, la velocidad del viento, la humedad del aire y la rugosidad aerodinámica (Capítulo 4). El cálculo de esta diferencia para la temperatura mínima puede realizarse utilizando un modelo muy simple ya que la radiación neta durante la noche es solamente de onda larga, la velocidad del viento es generalmente baja y la humedad relativa es alta. Un ejemplo de los resultados del modelo se presentan en la Tabla 28.1 para dos cultivos con 0.1 m de altura (p.ej. pradera) y 1 m (p.ej. cereal), cuando la temperatura del aire es de 0ºC y la velocidad del viento es baja. Se puede observar que la diferencia T_{aw} - T_c es menor para el cultivo más alto, cuando el cielo está nublado y cuando la humedad es alta.

Tabla 28.1. Diferencia entre la temperatura del aire en la estación meteorológica y la del cultivo cuando la temperatura del aire en la estación meteorológica es de 0ºC y la velocidad del viento es baja. Se han considerado dos condiciones de nubosidad (completamente nublados o despejados) y dos condiciones de humedad relativa (en zona seca, 70% y zona húmeda,100%) para cultivos de altura de 0.1 m y 1 m.

	Cultivo bajo h = 0.1 m		**Cultivo alto h = 1 m**	
RH	Nublado	Despejado	Nublado	Despejado
70	1.37	4.05	0.80	2.53
100	0.64	2.41	0.32	1.25

28.14. CÁLCULO DE LA TEMPERATURA MÁXIMA DEL CULTIVO

La temperatura máxima del cultivo también difiere de la temperatura máxima del aire. La temperatura del cultivo muy alta puede ser perjudicial para las etapas críticas reproductivas (p.ej. la polinización de los cereales) por lo que es importante entender cómo se ve afectada por los factores ambientales. Una vez más la turbulencia es un determinante principal de la diferencia de temperatura entre el cultivo y el aire por encima: conforme aumenta la velocidad del viento la diferencia de temperatura se reduce. Sin embargo, el déficit hídrico provoca cierre estomático, por lo que la refrigeración por transpiración se reduce y por lo tanto aumenta la temperatura del cultivo. Por lo tanto, el impacto de las altas temperaturas en los cultivos es

amplificado por el déficit hídrico. Aquí presentamos un procedimiento sencillo para el cálculo de la temperatura máxima prevista del cultivo a partir de datos meteorológicos estándar.

Utilizando las ecuaciones 9.10 y 9.12 calculamos la temperatura máxima del cultivo como:

$$T_{cx} = T_{ax} + [(1 - f_G)R_n - LE]\frac{r_{aH}}{\rho\, C_p} \tag{28.7}$$

donde T_{cx} y T_{ax} son la temperatura máxima del cultivo y del aire (ºC), respectivamente, f_G es la fracción de radiación neta invertida en el flujo de calor al suelo (se toma como 0.1 durante el día), LE es el flujo de calor latente, r_{aH} es la resistencia aerodinámica para el intercambio de calor, ρ es la densidad del aire y C_p es el calor específico del aire. Esta ecuación se evalúa en el momento en que ocurre la temperatura máxima, que se supone que se produce 3 h después del mediodía solar. En ese momento, la radiación solar en días soleados es aproximadamente el 84% del valor en el mediodía solar. También suponemos que, en promedio, la radiación neta es el 60% de la radiación solar, por lo que:

$$R_{nx} = 0.6 \cdot 0.84 \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{10^6 R_{sd}}{3600\, N} \tag{28.8}$$

donde R_{nx} es la radiación neta (W/m²) en el momento de máxima temperatura, R_{sd} es la radiación solar diaria (MJ/m²/día), y N es la longitud del día (horas). La variación temporal del flujo de calor latente (LE) a lo largo del día se supone que sigue una función senoidal, con el máximo ocurriendo en el momento que ocurre la temperatura máxima del aire. Por lo tanto, la LE máxima (LE_x, W/m²) se calcula como:

$$LE_x = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{2.45\, ET}{10^{-6}\, 3600\, N} \tag{28.9}$$

donde ET es la evapotranspiración real diaria (mm/día).

El cálculo de r_{aH} para condiciones inestables se puede realizar usando una ecuación simplificada derivada del modelo de Thom y Oliver como una función de la velocidad del viento sobre pradera (U_{2g}):

$$r_{aH} = \frac{25.9}{1 + 2.3\, {U_{2g}}/{c_w}} \tag{28.10}$$

El coeficiente c_w depende de la altura del cultivo y se encuentra entre 7.3 (h = 0.5 m) y 5.5 (h = 3 m). El cálculo de la velocidad del viento en el momento de máxima temperatura se realiza suponiendo que la velocidad media del viento durante el

día es dos veces el valor medio durante la noche, y que el valor durante el día sigue una función sinusoidal. Por lo tanto, en el momento de máxima temperatura, la velocidad del viento en la estación meteorológica es:

$$U_{2gx} = \left(1 + \frac{\pi}{2}\right) \frac{U_{2gm}}{1 + {}^{N}/_{24}} \tag{28.11}$$

donde U_{2gm} es la velocidad media del viento (24 h) medida en la estación meteorológica.

Para cultivos extensivos los valores típicos de r_{aH} varían entre 6 (alta velocidad del viento) y 12 m/s (velocidad del viento moderado) con un efecto mínimo de la altura del cultivo.

Ejemplo 28.2.

Trigo en floración en Córdoba, España.

11 de abril de 2014. c_w = 6.6, duración del día = 13 horas

Temperatura máxima del aire 29.7ºC, ET_0 = 5.1 mm/d, R_{sd} = 22.7 MJ/m²/d

Velocidad del viento media (estación meteorológica) = 2.3 m/s

El coeficiente máximo de trigo durante este período es de 1.1 (Capítulo 9), de manera que:

ET = 1.1 x ET_0 = 5.6 mm/d

Velocidad del viento máxima (estación meteorológica):

$$U_{2gx} = \left(1 + \frac{\pi}{2}\right) \frac{U_{2gm}}{1 + {}^{N}/_{24}} = 1.667 \cdot 2.3 = 3.84\ m/s$$

Resistencia aerodinámica:

$$r_{aH} = \frac{25.9}{1 + 2.3 \cdot 3.84/6.6} = 11.1\ s/m$$

Radiación neta máxima sobre el cultivo:

$$R_{nx} = 0.6 \cdot 0.84 \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{10^6 R_{sd}}{3600\ N} = 384\ W\ m^{-2}$$

LE máxima:

$$LE_x = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{2.45 \cdot ET}{10^{-6}\ 3600 \cdot N} = 460\ W\ m^{-2}$$

Así que la temperatura máxima del cultivo será:

$$T_{cx} = T_{ax} + [(1 - f_G)R_{nx} - LE_x]\frac{r_{aH}}{\rho\ C_p} = 29.7 + [(1 - 0.1)\ 384 - 460]\frac{11.1}{1184}$$
$$= 29.7 - 1.1 = 28.6°C$$

Si se produce déficit hídrico de manera que la ET es sólo el 50% del valor máximo (LE = 460/2 = 230 W/m²):

$$T_{cx} = 29.7 + [(1 - 0.1)\,384 - 230]\frac{11.1}{1184} = 29.7 + 1.1 = 30.8\,℃$$

Si el cultivo sufre el máximo déficit (cero ET):

$$T_{cx} = 29.7 + [(1 - 0.1)\,384 - 0]\frac{11.1}{1184} = 29.7 + 3.2 = 32.9℃$$

28.15. LOS INVERNADEROS

El más alto nivel de control del ambiente aéreo de las plantas se consigue en cámaras de cultivo que se utilizan sólo en los programas de investigación y mejora debido a su alto coste. El nivel más bajo corresponde al uso de cortavientos. Un segundo paso en el control del ambiente se consigue con micro-túneles y cubiertas de hilera que son láminas de plástico transparente montadas sobre aros que encierran las hileras de plantas. Las cubiertas flotantes son sostenidas por las propias plantas. Además, se emplean mallas de sombreo y otros tipos de cubiertas en la producción de árboles frutales para la protección contra el granizo, para mejorar la calidad de la fruta, y para limitar el acceso a algunas plagas de insectos. Se están probando mallas de diferentes colores que alteran el espectro de radiación para mejorar ciertas características de calidad de los frutos y para perturbar el vuelo de los insectos El tercer nivel de control es el de los invernaderos que son estructuras cubiertas con un material transparente. Se dispone de una amplia gama de diseños que difieren en costes, nivel de control y materiales de estructura y cubierta. El caso más simple es el invernadero plástico sin calefacción para la producción hortícola en zonas de invierno templado (p.ej. Almería, en el sur de España). Los diseños más sofisticados son estructuras metálicas con paneles de vidrio o de plástico rígido que disponen de calefacción artificial, iluminación suplementaria y fertilización con CO_2 (p.ej. invernaderos de los Países Bajos). En la horticultura de invernaderos el cultivo hidropónico se utiliza cada vez más en lugar de los suelos naturales, siendo aquella una tecnología donde las plantas son cultivadas con o sin apoyo mecánico en un medio artificial (arena, grava, lana de roca, turba, etc.) que se riegan con una solución nutritiva que se recicla.

Los materiales de cubierta de los invernaderos pueden ser láminas de plástico (p.ej. polietileno, PE), paneles de plástico rígido (p.ej. policarbonato) o de vidrio. Los materiales para cubierta muestran una alta transmitancia de PAR (por encima del 80%), pero pueden ser transparentes a infrarrojos (PE) o no (PE con aditivos específicos, vidrio, cualquier material cubierto por condensación). En el primer caso (transparente a IR) el enfriamiento radiativo durante la noche es casi el mismo que a cielo abierto. Esto puede ser mitigado mediante el uso de cortinas opacas a IR. Durante el día, el problema puede ser el contrario, debido a un calentamiento exce-

sivo del aire y de las plantas dentro del invernadero durante el final de la primavera o el verano. En ese caso es posible utilizar malla de sombreo para reducir la radiación, aumentar la ventilación o emplear sistemas de refrigeración.

En la sección 9.10 vimos que la evaporación dentro de los invernaderos de plástico sin calefacción se aproxima a la evaporación de equilibrio, es decir, se relaciona principalmente con la radiación en el interior del invernadero. En este caso, es fácil deducir el flujo de calor sensible en el interior como la diferencia entre la radiación neta y la evaporación. Este flujo de calor sensible será igual a la transferencia de calor sensible entre el aire del interior y el aire exterior. Para una tasa de renovación relativa dada (RR, hora^{-1}) y un invernadero de altura media h_g (m), podemos calcular la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior como:

$$T_{dentro} - T_{fuera} = \frac{(1 - k_L)\,\Delta + \gamma}{\Delta + \gamma} \frac{3600}{\rho C_p} \frac{k_{RN}\, R_{si}}{h_g\, RR} = \frac{C_T\, R_{si}}{h_g\, RR} \tag{28.12}$$

donde γ es la constante psicrométrica (aprox. 0.067 kPa/K), Δ es la pendiente de la presión de vapor en saturación frente a la temperatura (kPa/K, ver Ec. 9.22), ρ es la densidad del aire, C_p es el calor específico del aire a presión constante (véase 5.7), k_{RN} es el cociente entre radiación neta y radiación solar dentro del invernadero, que puede ser tomado como 0.7 y R_{si} es la radiación solar en el interior del invernadero (W/m^2). El coeficiente k_L representa la fracción de evaporación en relación con la evaporación de equilibrio. Por ejemplo, si el 75% de la superficie del invernadero está cubierta por vegetación bien regada entonces k_L = 0.75 y C_T varía de 1.16 a 0.85 entre 10ºC y 30ºC.

Ejemplo 28.2.

Un invernadero de 200 m^2 de superficie y 3 m de altura se encuentra a latitud 37ºS y se ventila con un caudal de aire de 5 m^3/s (18000 m^3/hora). Por lo tanto la tasa de renovación relativa es 18000/(200·3) = 30 hora^{-1}. El 21 de Junio la declinación solar es 23.45º por lo que la radiación solar máxima al mediodía en un día despejado es 507 W/m^2 (Capítulo 3). La cubierta es de polietileno con transmisividad 0.7, por lo que la radiación estimada en el interior es 355 W/m^2. La temperatura exterior es de 20ºC y K_L es 0.75 por lo que podemos deducir C_T = 0.99. Por lo tanto el aumento esperado de la temperatura en ese momento es:

$$T_{dentro} - T_{fuera} = \frac{C_T\, R_{si}}{h_g\, RR} = \frac{0.99 \cdot 355}{3 \cdot 30} = 3.9\ K$$

Por lo que la temperatura en el interior será 23.9ºC.

Este modelo simple es sólo una primera aproximación para caracterizar la micrometeorología de los invernaderos, ya que ignora otros procesos que contribuyen al

intercambio de calor (p.ej. la conducción a través de la cubierta), pero es muy útil para ilustrar las posibilidades de control climático en invernaderos sin calefacción, a saber, reducir la radiación en el interior, poniendo una malla de sombreo o encalando el plástico, o mediante la manipulación de la ventilación a través de la apertura/cierre de los laterales/techo o usando ventiladores. Además de mantener la temperatura dentro del intervalo óptimo para el crecimiento de la planta, se necesita la ventilación para evitar una humedad excesiva del aire dentro del invernadero, que puede aumentar el riesgo de enfermedades. Esto es especialmente importante durante la noche cuando la temperatura se aproxima a la temperatura del punto de rocío y se produce condensación sobre las plantas y en la superficie interior de la cubierta.

BIBLIOGRAFÍA

Burke S (1998) Windbreaks. Inkata Press, Port Melbourne, Australia

Grace J (1988) Plant response to wind. Agric Ecosystems Environ 22/23:71-88

Rosenberg NJ, Blad BL, Verma SB (1983) Microclimate: the Biological Environment. John Wiley and Sons

Castilla N (2013) Greenhouse technology and management (2nd ed) CABI Publishing, Wallingford UK

Capítulo 29

Protección contra las heladas

J.P. DE MELO-ABREU
F.J. VILLALOBOS
L. MATEOS

RESUMEN:

Las heladas afectan a la producción agrícola reduciendo el rendimiento y/o la calidad del producto. Para evitar daños por heladas la mejor estrategia es utilizar métodos pasivos que implican una buena selección de especies, variedades, fechas y lugares de siembra, manteniendo el suelo compactado, húmedo y liso, entre otras opciones. Esto requiere el conocimiento de la distribución de frecuencias de las temperaturas mínimas y la evaluación del efecto de las temperaturas bajas en el rendimiento del cultivo (es decir, temperaturas críticas de daño). Sin embargo, los mecanismos de los daños por heladas son bastante complejos y dependen en parte de la resistencia de la planta, por lo que las predicciones de daños son muy inciertas. Cuando la helada ocurre existen métodos de control activos (de protección) que reducen el daño al mínimo, incluyendo la reducción de las pérdidas de radiación de onda larga (p.ej, cubiertas de plástico), el calentamiento directo por quema de combustible, la mezcla de aire (p.ej, máquinas de viento), y el riego por aspersión para la liberación del calor de fusión.

29.1. INTRODUCCIÓN

Una helada es la ocurrencia de una temperatura del aire igual o inferior a 0ºC a una altura entre 1.25 y 2 m, medida en garita o estructura de protección. La mayoría de los sistemas agrícolas de los climas templados se ven afectados por las heladas. La limitación a la producción agrícola debida a las heladas por lo general se caracteriza por el período libre de heladas medio, que es el tiempo desde la última helada de primavera hasta la primera helada de otoño. Este periodo limita la temporada de crecimiento de muchas especies cultivadas y determina la posibilidad de cultivar una especie en una región dada.

El potencial de riesgo de heladas aumenta a medida que nos alejamos del ecuador, con una banda entre los dos trópicos, donde no se producen heladas (excepto a gran altitud). Las áreas con períodos libres de heladas mayores de 240 días se encuentran entre 12 y 40º de latitud e incluyen las regiones agrícolas más importantes. En estas regiones a menudo se previenen los daños por heladas en frutas y hortalizas. Las áreas con períodos libres de heladas de 180-240 días se extienden hasta 50º, a pesar de que se pueden encontrar a latitudes más altas debido a la influencia marítima. Cuando el período libre de heladas es de menos de 90 días, la agricultura se ve muy limitada y no se pueden cultivar la mayoría de las especies agrícolas.

La helada es el fenómeno meteorológico responsable de las mayores pérdidas de producción agrícola en los Estados Unidos y, probablemente, en el mundo. Entre los métodos de protección contra heladas, los más útiles son los métodos preventivos, como la elección correcta de la especie/variedad, la selección del sitio, la elección correcta de la fecha de siembra, y las técnicas de manejo apropiadas para mantener los órganos susceptibles de la planta separados del suelo, una nutrición adecuada de las plantas y medidas para mejorar la conductividad térmica del suelo. Los métodos de protección, que se implementan cuando ocurren las heladas suelen ser caros y por lo tanto sólo pueden emplearse en cultivos hortícolas y frutales de alto valor.

29.2. EFECTOS DE LAS HELADAS SOBRE LA PRODUCCIÓN DE LOS CULTIVOS

El daño por helada depende de muchos factores tales como la especie, la variedad, el grado de aclimatación, el estado de los tejidos de la planta (que depende de la etapa de desarrollo, y de las prácticas de riego y fertilización, entre otros factores), la altura del cultivo, el tipo de poda, la velocidad de enfriamiento del aire, la duración de la helada y la temperatura mínima alcanzada. Esta complejidad hace que sea difícil predecir los daños por heladas. Un problema adicional es que la temperatura mínima registrada en estaciones meteorológicas (de acuerdo con las reglas estándar) no es la misma que la temperatura del cultivo en un campo situado en la zona.

La resistencia de los cultivos al frío se evalúa de acuerdo con la temperatura mínima media más baja a la que pueden sobrevivir. En las zonas tropicales, las plantas

son generalmente sensibles y el daño puede ser el resultado de la exposición a bajas temperaturas por encima del punto de congelación, a veces de hasta 12ºC. El daño a los tejidos de las plantas causadas por las bajas temperaturas por encima de 0ºC se denomina daño por frío. El daño por frío es un problema importante en plantas hortícolas cuando las temperaturas bajas ocurren de forma extemporánea provocando daños a las especies sensibles al frío (la mayoría de las principales especies hortícolas). Al igual que con las heladas, muchos factores fisiológicos y ambientales afectan a la magnitud del daño; por ejemplo, los frutos inmaduros son más sensibles que los frutos maduros. Contrariamente a las heladas, los síntomas de daño por frío se puede revertir, al menos parcialmente, si la exposición a bajas temperaturas es breve.

El daño por heladas en las plantas se produce por debajo de 0ºC, a temperaturas que varían de aproximadamente -1ºC hasta -196ºC. Este desplazamiento se explica por dos mecanismos: la evitación y/o la tolerancia a la congelación. Las plantas evitan la congelación intercelular ya sea porque los solutos fuera de la protoplastos bajan el punto de congelación de estas soluciones acuosas o porque ocurre subfusión (la temperatura del líquido baja por debajo de su punto de congelación sin convertirse en sólido), debida a la ausencia de núcleos de congelación. La tolerancia sucede cuando, a pesar de la ocurrencia de congelación intercelular y la consiguiente contracción y deshidratación de los protoplastos, después de la descongelación hay recuperación completa de la estructura y función de los protoplastos. La congelación intracelular, si es que se produce en condiciones naturales de cultivo, siempre es letal para la célula. Cuando ocurre congelación ésta se inicia en los espacios intercelulares debido a la menor concentración de solutos fuera que dentro de los protoplastos. La disminución en el potencial de agua debido a la congelación y la concentración de solutos induce la pérdida de agua de los protoplastos, lo que resulta en su contracción y en un aumento de la concentración de solutos en su interior.

Se han propuesto muchos mecanismos de lesión por heladas, pero es posible que en general los tejidos sean dañados por una lesión mecánica directa por el hielo formado en el exterior de las células o por la contracción y la deshidratación experimentada por el protoplasto. En este caso, la desnaturalización de las proteínas nucleares puede ser la causa última de la lesión.

Inicialmente, la *temperatura crítica de daño* (T_{crit}) se definió como la temperatura máxima que resulta en lesiones por helada en un órgano de la planta que se somete a la misma durante más de treinta minutos. El término se ha extendido a niveles específicos de lesión. Por ejemplo, T_{10} para las flores del manzano se refiere a la T_{crit} que inflige una pérdida del 10% de las flores, y T_{90} correspondería a la pérdida del 90%.

Establezcamos algunas consideraciones generales sobre los cereales y los árboles frutales que no son de origen tropical. Durante el reposo invernal, los órganos de la planta tienen a menudo una T_{crit} muy baja. Sin embargo, después de la brotación de las yemas las temperaturas críticas se acercan lentamente a su límite superior. Durante el crecimiento activo, la mayoría de los órganos de la planta tienen una T_{crit} sólo unos pocos grados por debajo de 0ºC. Por otra parte, la diferencia T_{10}-T_{90} tiende a disminuir a medida que progresa el desarrollo fenológico de la plan-

ta hasta alcanzar un mínimo que suele coincidir con el cuajado de granos o frutos (ver Fig. 29.1). Durante el período de reposo y el inicio del crecimiento, las plantas tienen una capacidad considerable para mantener una baja T_{crit} (o reducirla de forma activa) en respuesta a la persistencia de las bajas temperaturas, en un proceso llamado *endurecimiento* o *aclimatación.* A partir de la floración, la capacidad de endurecimiento desaparece por completo o es muy reducida. Por otro lado, después de la exposición a un período de altas temperaturas puede producirse la pérdida de la aclimatación.

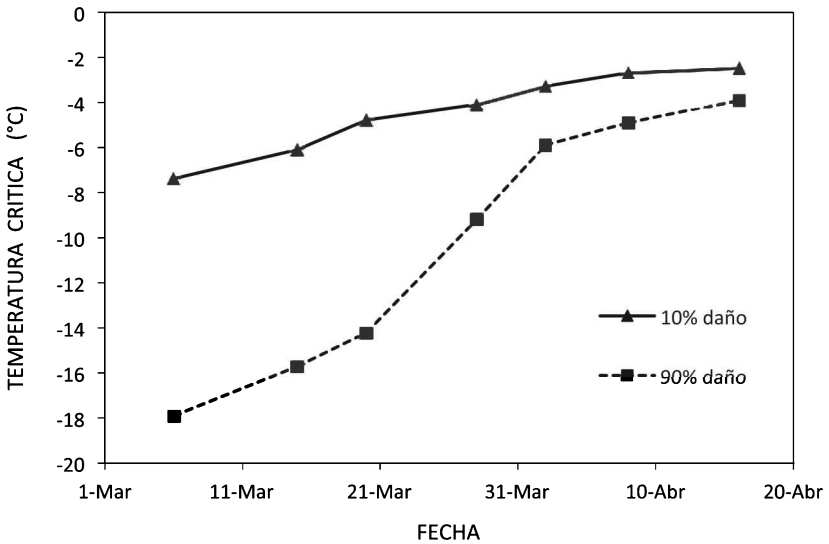


Figura 29.1. Valores típicos de temperaturas T_{10} y T_{90} para yemas de cerezo en distintas fechas, observadas en Washington State University, Prosser Research and Extension Centre. Adaptado de Proebsting y Mills (1978) J Amer Soc Hor Sci 103, 192–198.

La naturaleza de los daños por congelación varía con la planta/órgano afectado. La mayoría de las hortalizas que se lesionan presentar un aspecto quemado, o parecen pastosos, o presentan cambios en el color o la textura. Bajo inviernos rigurosos, cuando la capa de nieve es escasa, los cereales de invierno pueden sufrir lesiones en hojas o incluso en el nudo de ahijamiento. Después de la emergencia, los daños por heladas ocurren por lo general durante la floración o el cuajado de granos. En climas templados, los árboles frutales de hoja caduca y la vid no suelen verse afectados por las heladas de invierno. Sólo cuando las temperaturas son muy bajas, en algunos ambientes extremos o cuando hay una pérdida de la aclimatación, las heladas dañan las yemas latentes o, más raramente, los troncos de los árboles. Después de brotación de las yemas, en el caso de manzano, peral y frutas de hueso, las flores y frutos pequeños son muy sensibles a las heladas lo que puede causar pérdidas considerables en esas etapas. A veces, sin embargo, después de la polinización sólo hay una pérdida parcial de semillas que afecta al crecimiento de los frutos, en particular en el caso de frutales de hueso que sólo tienen una o dos semillas por fruto. Cuando un

fruto aún pequeño sufre una helada ligera se forma un tejido grueso que crece y cubre parte de la fruta, lo que resulta en el deterioro de su calidad.

Una lista detallada de las temperaturas críticas se puede encontrar en la revisión de Snyder y De Melo-Abreu. La mayoría de las hortalizas y frutas tienen temperaturas máximas de congelación entre -0.4ºC y -2.7ºC, que representa el límite superior de la temperatura crítica, ya que la capacidad calorífica de la estructura y un cierto grado de subfusión pueden dar lugar a temperaturas de congelación reales que son algo inferiores. Los tejidos más suculentos suelen tener temperaturas críticas más altas.

Una serie de cultivos de origen tropical (tabaco, tomate, pepino, cacahuete, arroz, melón y algodón) presentan una T_{crit} para todo el ciclo de cultivo, que disminuye de 0ºC a -2ºC. El mijo y el maíz tienen un T_{crit} alrededor de -2ºC a -3ºC durante la germinación y el llenado del grano, y un grado más alrededor de la floración.

La Tabla 29.1 muestra algunas temperaturas críticas en relación con la etapa de desarrollo para cereales, cultivos forrajeros, remolacha azucarera y olivo. La Tabla 29.2 muestra las temperaturas críticas en relación a la etapa de desarrollo para algunos frutales de hoja caduca y vid.

Tabla 29.1. Temperaturas críticas en relación con la etapa de desarrollo para diferentes especies cultivadas. Adaptado de Snyder y Melo-Abreu (2005).

Especie	Temperatura crítica (°C)**	Fase
Alfalfa	-6/ -14	
Cebada (Invierno)*	/ -17.3 a -12.9	Ahijamiento
Cebada (Invierno)*	-1 a -2	Floración
Cebada (Invierno)*	-2 a -4	Llenado del grano
Avena	/-10.5 a -6.5	Ahijamiento
Avena *	-8 a -9	Germinación
Avena *	-1 a -2	Floración
Avena *	-2 a -4	Llenado del grano
Olivo	-12.4 a -4.1 /-19.3 a -8.1	Reposo vegetativo
Patata*	-2 a -3	Germinación
Patata *	-1 a -2	Floración
Centeno (Invierno)*	/-19.5 a -25	Ahijamiento
Raigrás (Italiano)	/-8.4 a -7.4	Estadio 3-4 hojas
Raigrás (Perenne)	/-13.95 a -10.31	Madurez
Soja	/-4.5	Plántulas
Soja *	-1	Llenado de semillas
Trébol subterráneo	-5.5/-7.8	Plántulas

Remolacha azucarera*	-6 a -7	Germinación
Remolacha azucarera*	-2 a -3	Floración
Girasol*	-3.9	Iniciación floral
Girasol*	-0.6 a 0	Floración
Triticale	/-17.5 a -9.2	Ahijamiento
Trigo (primavera)	-2/-5.5	Ahijamiento
Trigo (invierno)	-3/-18	Ahijamiento
Trébol blanco	-7.7 a -4.9/-20.3 a -7.4	

* En condiciones de campo. ** Antes de la barra (/) las temperaturas corresponden a plantas no endurecidas y después de la barra a endurecidas.

Tabla 29.2. Temperatura crítica para varias especies de frutales de hoja caduca y vid. Los valores de la floración son la media desde el principio al final de la floración. Adaptado de Proebsting y Mills, 1978. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 103:192-198 y Snyder y Melo-Abreu (2005).

Especie	Estadio fenológico	T_{10} (°C)	T_{90} (°C)
Manzano	Punta plateada	-11.9	-17.6
	Floración	-2.4	-3.9
Melocotonero	Hinchado de yemas	-7.4	-17.9
	Floración	-2.8	-4.9
Peral	Escalas separadas	-8.6	-17.7
	Floración	-2.9	-5.3
Vid	Hinchado de yemas	-10.6	-19.4
	Brotación	-3.9	-8.9
	Primera hoja	-2.8	-6.1
	Cuarta hoja	-2.2	-2.8

29.3. TIPOS DE HELADA

Las *heladas de radiación* se producen en noches de calma con un ambiente claro y seco, lo que aumenta mucho las pérdidas por radiación de onda larga (Capítulo 3). La baja velocidad del viento favorece la inversión de temperatura. La figura 29.2 muestra un ejemplo de la evolución de los perfiles de temperatura durante la noche. Cuando el viento sopla durante la noche el perfil de temperatura se hace más uniforme y la temperatura del aire aumenta (Fig. 29.3). Cuando el viento se detiene, la temperatura desciende de nuevo (Fig. 29.3).

Las *heladas de advección* se producen como resultado del transporte a gran escala de masas de aire frío. Se producen en días nublados o noches con viento moderado o fuerte con el paso de un frente frío. No ocurren inversiones de temperatura, por

lo menos en la primera fase de este tipo de eventos. Más tarde, después de que el viento disminuye, puede desarrollarse una inversión si se producen condiciones de enfriamiento de la superficie.

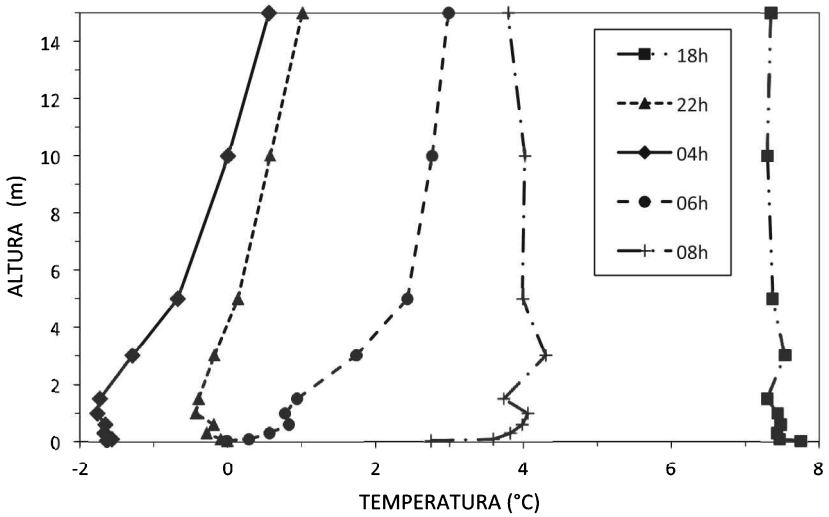


Figura 29.2. Desarrollo de una inversión de la temperatura sobre una plantación de manzanos en el norte de Portugal. Adaptado de Snyder y de Melo-Abreu (2005).

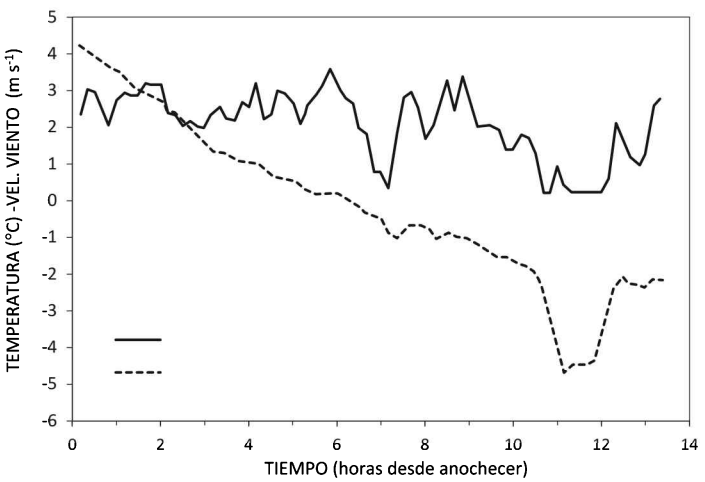


Figura 29.3. Evolución temporal de la temperatura y la velocidad del viento sobre suelo desnudo durante la noche. Espiel (España), 3-4 de de febrero de 2012.

La *escarcha* se produce cuando aparecen cristales de hielo sobre el cultivo por la deposición de vapor de agua o la congelación del rocío. Ambos procesos liberan calor y por lo tanto retrasan la congelación de los tejidos del cultivo. Si la cantidad

de hielo es grande se utiliza el término de helada blanca. Cuando la concentración de vapor de agua en el aire es muy baja (punto de rocío por debajo de la temperatura mínima), no hay rocío para congelar y no hay posibilidad de deposición por lo que los tejidos se ven afectados sin formación previa de hielo, causando necrosis de los tejidos (helada negra). La presencia de escarcha blanca indica que pueden producirse daños, pero la helada negra es la visualización del daño que ya se ha producido.

29.4. CLIMATOLOGÍA DE LAS HELADAS

El período libre de heladas es el tiempo entre la última helada (finales del invierno o primavera) y la fecha de la primera helada del otoño. Este período es muy variable de un año a otro, por lo que tiene un valor limitado para evaluar el riesgo de daños por heladas, que debe basarse en la distribución de frecuencias de las fechas de las heladas. Las fechas de la primera y de la última helada pueden ser consideradas como variables aleatorias independientes que siguen la distribución normal. Esto permite el cálculo de la probabilidad de heladas durante períodos específicos. Por ejemplo, la probabilidad de heladas de primavera después de un día dado es:

$$P(helada\ después\ de\ día\ t) = P_y \cdot P\left[z > \frac{t - m_{LF}}{s_{LF}}\right] \tag{29.1}$$

donde P_y es la fracción de años en los que ocurren heladas, m_{LF} es la fecha media de la última helada, s_{LF} es la desviación estándar correspondiente y z es la distribución normal estándar que puede calcularse utilizando tablas o con la siguiente función aproximada:

$$P(z \leq x) = 0.5\left(1 \pm \sqrt{1 - exp\left(\frac{-2\,x^2}{\pi}\right)}\right) \tag{29.2}$$

donde se utiliza la raíz positiva si x> 0 y la raíz negativa cuando x <0. Conviene recordar aquí que P (z> x) = 1-P (z≤x).

Del mismo modo, la probabilidad de heladas de otoño antes de un día determinado es:

$$P(helada\ antes\ de\ día\ t) = P_y \cdot P\left[z < \frac{t - m_{FF}}{s_{FF}}\right] \tag{29.3}$$

donde m_{FF} y s_{FF} son la media y la desviación estándar para la fecha de la primera helada. Téngase en cuenta que estas estadísticas sólo se calculan para los años en que se producen heladas.

Ejemplo 29.1.

Las fechas de la primera y última helada (expresadas en días desde el 1 de septiembre) durante 15 años se dan en la Tabla 29.3 para los dos lugares (Gibraleón y Jerez del Marquesado) en el sur de España.

Tabla 29.3. Fechas de la primera y última helada (expresadas en días desde el 1 de septiembre) durante 15 años para dos localidades (Gibraleón y Jerez del Marquesado) en el sur de España. También se muestra la temperatura mínima observada cada año.

	Gibraleón			Jerez del Marquesado		
	Fecha de helada		T_{min}	Fecha de helada		T_{min}
Año	Primera	Última	ºC	Primera	Última	ºC
2000			2	69	181	-2.9
2001			1.7	70	185	-5.7
2002	133	133	-0.6	94	217	-8.6
2003			0.7	88	223	-7.3
2004	119	168	-3.9	73	223	-15
2005	166	166	0	75	222	-10.2
2006	147	147	-0.6	98	219	-7
2007			1.2	77	212	-7.1
2008	131	132	-2.6	60	226	-6.1
2009	106	242	-1	45	247	-5.9
2010	156	156	-0.2	77	197	-5.4
2011	122	167	-3.1	104	229	-10.4
2012			0.8	88	243	-4.7
2013			1.1	76	208	-4.6
2014	123	129	0	96	207	-4.7
Media	133.67	160.00	-0.30	79.33	215.93	-7.04
Desviación estándar	19.24	34.52	1.75	15.65	18.54	3.02

En Gibraleón no se produjo ninguna helada en 6 de los 15 años, por lo que las estadísticas de la media y la desviación estándar (que se muestra también en la Tabla 29.3) se calculan para los 9 años restantes y $P_y = 0.6$. Las fechas medias de la primera y última helada son 134 días (12 de enero) y 160 (10 de febrero). La probabilidad de heladas a partir del 1 de marzo (día 182) será la siguiente:

$$P(helada\ después\ de\ 182) = P_y \cdot P\left[z > \frac{t - m_{LF}}{s_{LF}}\right] = 0.6 \cdot P\left[z > \frac{182 - 160}{34.5}\right]$$
$$= 0.6 \cdot P[z > 0.64] = 0.6\,(1 - P[z \leq 0.64]) = 0.6 \cdot (1 - 0.74)$$
$$= 0.156$$

Ahora vamos a calcular la probabilidad de heladas antes del 1 de diciembre (día 92):

$$P(helada\ antes\ de\ 92) = P_y \cdot P\left[z \leq \frac{t - m_{FF}}{s_{FF}}\right] = 0.6 \cdot P\left[z \leq \frac{92 - 133.7}{19.24}\right]$$
$$= 0.6 \cdot P[z \leq -2.17] = 0.6 \cdot 0.012 = 0.007$$

En Jerez del Marquesado las fechas medias de la primera y última helada son los días 79 (18 de noviembre) y 216 (4 de abril). Las probabilidades de helada después del 1 de marzo y antes del 1 de diciembre son 97 y 80%, respectivamente.

29.5. RIESGO DE TEMPERATURAS EXTREMADAMENTE FRÍAS

Históricamente, la agricultura se ha expandido hacia un ambiente menos favorable donde los riesgos de eventos extremos van en aumento. Muchas de las decisiones agrícolas tienen que basarse en la probabilidad de eventos adversos que pueden matar a las plantas o reducir sustancialmente el rendimiento por lo que la agricultura resulta inviable. Para el análisis del riesgo de heladas distinguimos la probabilidad $P(T<T_c)$ de ocurrencia de temperatura por debajo de un umbral crítico en cualquier año y el riesgo (R), que es la probabilidad de que el evento ocurra al menos una vez durante un período de diseño (n_d) (n_d podría ser la vida útil de una plantación en años, por ejemplo). En lugar de riesgo podemos usar certeza (C = 1-R), que es entonces la probabilidad de que el evento no ocurra durante el período de diseño. Suponiendo una distribución de Bernouilli, la certeza (C) está relacionada con la probabilidad de tener una temperatura por debajo de T_c en cualquier año:

$$C = [1 - P(T < T_c)]^{n_d} \tag{29.4}$$

Por ejemplo, si la probabilidad de temperatura por debajo de -10ºC en un año determinado es 0.003 (es decir, ocurre 3 veces en 1000 años), entonces la certeza para un período de diseño de 20 años es de 0.94, es decir, estamos 94% seguros de que las temperaturas no caerán por debajo -10ºC en 20 años consecutivos.

La probabilidad de que un evento extremo ocurra en un año determinado se calcula como el cociente entre número de años en que ocurre el evento extremo y número de años de datos. Al tratarse de eventos raros necesitaríamos una serie de datos muy larga (p.ej., más de 1000 años), de la que nunca vamos a disponer. Alternativamente, para una serie de datos limitada, calculamos los parámetros de la distribución estadística subyacente. Haan ha recomendado la distribución de probabilidad de valores extremos tipo I (Gumbel):

$$P(T < T_c) = 1 - exp\left[-exp\left(\frac{T_c - \beta}{\alpha}\right)\right] \tag{29.5}$$

donde α = σ/1.283, β = μ + 0,577 α, μ es la media de las temperaturas mínimas extremas registradas cada año y σ es la desviación estándar correspondiente. El parámetro β es la moda (valor más frecuente) de la distribución.

De las ecuaciones anteriores podemos deducir otra para el cálculo de la certidumbre:

$$C = \left\{exp\left[-exp\left(\frac{T_c - \beta}{\alpha}\right)\right]\right\}^{n_d} \tag{29.6}$$

Ejemplo 29.1.

La temperatura mínima anual en Jerez del Marquesado (España) tiene una media de -7.04ºC con desviación estándar 3.02ºC (Tabla 29.3). Por lo tanto los parámetros de la distribución Gumbel son α = σ/1.283 = 2.355ºC y β = μ + 0,577 α = -7.04 + 0.577 2.355 = -5.68ºC. Si estamos pensando en establecer una plantación durante 20 años y la temperatura crítica es -12ºC la certeza será:

$$C = \left\{exp\left[-exp\left(\frac{-12 - (-5.68)}{2.355}\right)\right]\right\}^{20} = 0.255$$

Que es muy baja. Este valor indica que el riesgo de fracaso de nuestra plantación es del 75%. En la otra localidad (Gibraleón) la certeza será de 0.998, lo que indica un riesgo insignificante para la plantación.

29.6. UN MODELO SIMPLE DEL ENFRIAMIENTO NOCTURNO DE LA SUPERFICIE

El enfriamiento de la superficie del suelo durante la noche puede ser analizado mediante el balance de energía del suelo (Capítulo 6):

$$R_n = -C + H + LE + G \tag{29.7}$$

donde R_n es la radiación neta, C es el calor liberado por congelación del agua, H es el flujo de calor sensible y LE es el flujo de calor latente. Combinando las ecuaciones de flujo de calor al suelo (Capítulo 6) y de pérdida de radiación de onda larga (capítulo 3) Brunt propuso un modelo muy simple para calcular la variación de la temperatura de la superficie durante la noche. Las asunciones incluyen que LE = 0, H = 0 y un perfil de suelo isotérmico al ponerse el sol. Esto implica que el enfriamiento del suelo durante la noche es equivalente a la pérdida de radiación de onda larga, mientras que los otros procesos se ignoran. Brunt también supuso que la radiación neta no cambia durante la noche.

La solución analítica para T_s es:

$$T_s - T_{s0} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{\sqrt{KC_v}} R_n \sqrt{t} \tag{29.8}$$

donde T_{s0} es la temperatura en la superficie al ponerse el sol, C_v es el calor específico del suelo por unidad de volumen (J/m^3/K), K es la conductividad térmica (W/m/K) y t es el tiempo transcurrido después de la puesta del sol (s). Téngase en cuenta que la raíz cuadrada de $K \cdot C_v$ es la admitancia térmica (Capítulo 6). Esta ecuación implica que la temperatura durante la noche disminuirá en proporción a la pérdida de radiación de onda larga y a la raíz cuadrada del tiempo después de la puesta del sol. Los suelos con baja admitancia (arenoso, seco) se enfriarán más rápido.

Ejemplo 29.1.

Para un suelo franco en Punto de Marchitez la admitancia es 1057 W $m^{-2}s^{1/2}K^{-1}$ (Tabla 6.2). Para R_n=-70 W/m^2, la caída de temperatura desde el anochecer sería de 10, 14.2 y 17.4 K después de 5, 10 o 15 horas, respectivamente. Si el suelo se encontrara en saturación (admitancia térmica 1835 W m^{-2} $s^{1/2}$ k^{-1}) la temperatura bajaría sólo 5.8, 8.2 y 10 K.

El ejemplo anterior ilustra el importante efecto del contenido de agua del suelo en el enfriamiento nocturno.

29.7. PROTECCIÓN CONTRA LAS HELADAS

Los métodos de protección contra las heladas incluyen métodos que se implementan antes de la noche en que ocurre la helada con el fin de evitar o minimizar los daños por heladas (métodos *pasivos, indirectos* o *preventivos),* y métodos que se implementan durante la noche de helada (es decir, *activos, directos, de protección*). A menudo, el efecto de los métodos pasivos, que son relativamente baratos, se suma al efecto de los métodos activos. Por lo tanto, los métodos pasivos deben ser considerados siempre y cuando sea oportuno, implementados en conjunto con uno o más métodos activos, o de forma aislada. Una descripción completa de la mayoría de los métodos existentes y herramientas para su diseño está disponible en Snyder y De Melo-Abreu (2004).

29.7.1. Métodos pasivos

29.7.1.1. Elección del lugar

La sección 29.6 describe la física del proceso de enfriamiento en una ubicación específica ignorando el movimiento horizontal de aire. A medida que el aire se enfría, aumenta su densidad, y tenderá a fluir a áreas de menor densidad, normalmente hacia abajo para acumularse en los valles y depresiones. El grado de acumulación de aire frío o ventilación depende de la topografía, de la velocidad del viento y de los gradientes de temperatura.

Los cultivos sensibles no deben ser colocados en lugares donde se acumula el aire frío debido a la orografía (depresiones) o la existencia de obstáculos artificiales (cercas, cortavientos).

La presencia de grandes masas de agua (lagos, mar) a barlovento para los vientos fríos puede reducir el riesgo de heladas debido al intercambio de calor entre el agua y el aire.

Las áreas con mayor riesgo pueden ser detectadas utilizando mapas de temperaturas mínimas que se podrían obtener mediante imágenes infrarrojas térmicas. Como regla práctica los lugares donde la niebla es más frecuente son también aquellos en los que las heladas de radiación son más probables.

29.7.1.2. Selección de especies, variedades y técnicas de cultivo

Las especies cultivadas difieren en su sensibilidad al frío y a las heladas, y puede existir variabilidad genética dentro de cada especie. Teniendo en cuenta la climatología de las heladas en la ubicación y las temperaturas críticas para los cultivos alternativos en ese lugar, podemos elegir la especie y el cultivar con el fin de reducir el riesgo de daños por heladas.

Algunas técnicas de cultivo pueden ser beneficiosas, cuando exploran el conocimiento de la biometeorología de las heladas. En frutales de hoja caduca, la poda se realiza generalmente en invierno, pero, en lugares propensos a fuertes heladas, es aconsejable la poda tardía desde el punto de vista de la prevención de daños por heladas, ya que las plantas son más sensibles justo después de la poda y la probabilidad de fuertes heladas disminuye a medida que llega la primavera. En el mismo sentido, la poda promueve la brotación de las yemas, por lo que la poda tardía expone el nuevo crecimiento a heladas menos severas y menos frecuentes. Las técnicas de poda de formación que elevan la altura de los órganos sensibles son beneficiosas ya en las noches de helada ocurre en general una inversión de temperatura que somete a los niveles más bajos a una menor temperatura. Se ha logrado el retraso de la brotación en frutales de pepita con riego por aspersión periódico a finales del invierno, lo que enfría las yemas y retrasan su desarrollo hasta pasado el período con mayor riesgo de heladas. La fertilización con nitrógeno y el buen estado hídrico tienden a elevar la temperatura crítica. Por lo tanto, cuando hay una alta probabilidad de heladas en los próximos días no es aconsejable fertilizar con N o regar (pero véase también la sección siguiente).

Algunas bacterias llamadas activas en la nucleación de hielo (INA) pueden actuar como núcleos de congelación y, por tanto, iniciar el proceso de congelación. Estas bacterias se concentran a menudo en las cubiertas vegetales de protección del suelo y en las malas hierbas presentes en la plantación y su eliminación puede ayudar en la prevención de daños por heladas.

29.7.1.3. El manejo del suelo

La temperatura mínima de la superficie puede incrementarse mediante el aumento de la admitancia térmica (riego, compactando el suelo) o aumentando la energía radiante que llega al suelo durante el día (evitar acolchados opacos o cultivos de cobertura). El calentamiento del suelo durante el día depende también de la partición

entre G y H (Capítulo 6) por lo que una superficie del suelo lisa (alta resistencia aerodinámica) mejorará el calentamiento del suelo en comparación con una superficie del suelo rugosa. Por lo tanto las labores, al reducir la admitancia térmica y aumentar la rugosidad de la superficie, no son deseables si se prevén heladas.

El riego aumenta la admitancia térmica del suelo, lo que reduce el enfriamiento nocturno, pero también reduce el calentamiento diurno del suelo por el aumento en la energía gastada en evaporación desde la superficie del suelo (Capítulo 6). La mejor situación sería tener un suelo húmedo cubierto con plástico transparente. Si eso no es posible, la mejor opción es parar el riego con algunos días de antelación para permitir que se seque la superficie del suelo, y por lo tanto reducir la evaporación, mientras que el resto del perfil está húmedo (alta admitancia térmica).

El flujo de calor al suelo también se incrementa después de la eliminación de los cultivos de protección del suelo o las malas hierbas en las plantaciones. Su eliminación debe hacerse preferiblemente mediante el uso de herbicidas que eliminan la cubierta pero no se deben realizar labores por el cambio concomitante en la densidad aparente en la superficie del suelo. Cuando se emplea laboreo, las labores deben hacerse con mucha antelación del período de heladas para que el suelo se asiente y los residuos se descompongan.

29.7.2. Métodos activos

29.7.2.1. Aumento de la radiación interceptada

Las heladas de radiación se producen cuando la pérdida de radiación de onda larga es alta (ausencia de nubes, baja humedad del aire). La radiación térmica puede ser interceptada en parte para reducir las pérdidas de onda larga mediante pulverización de agua. Para que ésta sea eficaz, el diámetro de las gotas o partículas debe tener un diámetro del mismo orden que la de la radiación térmica (8-12 micras).

Las nubes de humo artificiales pueden ser producidas por la combustión de diferentes materiales (neumáticos, madera o combustible), pero ya rara vez se utilizan (pequeño diámetro de las partículas, efecto muy efímero, alto costo de la energía, problemas de contaminación).

Otra forma de atrapar la radiación de onda larga es mediante el uso de nubes ácidas sólidas comerciales o aerosoles que tienen un tamaño de partícula adecuado y que se producen in situ mediante la combinación de varios productos químicos.

Algunos materiales que son casi opacos a la radiación de onda larga (p.ej. mantas térmicas) se pueden utilizar para cubrir cultivos de alto valor.

29.7.2.2. Mezcla de aire

Los perfiles de temperatura invertidos, típicos de noches con helada de radiación, pueden ser homogeneizados mediante la mezcla de aire de diferentes alturas, lo

que aumenta la temperatura a la altura del cultivo. La eficacia de la mezcla de aire será proporcional al gradiente de temperatura.

Aunque se han utilizado helicópteros, la mejor opción para la mezcla de aire es una máquina de viento que consiste en una torre de acero con un gran ventilador giratorio cerca de la parte superior. Los ventiladores, con aspas de diámetro entre 3 y 5 m, se encuentran a unos 10-11 m de altura y están orientados para trabajar con un ligero ángulo hacia abajo (p.ej, 7º) para mejorar la mezcla.

29.7.2.3. Calentamiento del aire o del cultivo

Las pérdidas de energía del cultivo durante una helada pueden ser compensadas mediante la quema de combustible (sólido, líquido o gas) en estufas o calentadores, que transfieren energía por radiación térmica y convección. La pérdida de energía del cultivo suele estar en el rango de 20-40 W m^{-2} mientras que el gasto de energía en las estufas es típicamente de 140 y 280 W m^{-2} lo que indica una eficiencia muy baja. Las mejores condiciones para este método son ausencia de viento y presencia de una inversión fuerte.

La temperatura del aire que sale de la estufa es muy alta, por lo que asciende rápidamente y se mezcla con el aire circundante más frío, y se va enfriando hasta que llega a la altura donde el aire tiene la misma temperatura. Finalmente, el aire de mezcla se enfria, se convierte en más denso y desciende, lo que crea un patrón de circulación dentro de la capa de inversión. Cuando hay una inversión fuerte (es decir, un techo bajo), el aire caliente se eleva a una altura inferior y el volumen de influencia de las estufas es más pequeño por lo que la eficiencia es mayor. La eficiencia es baja cuando los calentadores son demasiado grandes o demasiado calientes ya que el aire calentado puede atravesar la parte superior de la capa de inversión.

29.7.2.4. Riego

El riego es una herramienta muy útil para proteger los cultivos contra las heladas, lo que se basa principalmente en la liberación de calor por enfriamiento del agua (4.18 10^{-3} MJ/K/kg) y por la congelación (0.334 MJ/kg), aunque algo de calor puede ser gastado en evaporación. En el mejor de los casos, cuando se riega con agua subterránea, ésta tiene una temperatura próxima a la temperatura media anual del aire en el lugar, por lo que la contribución por enfriamiento del agua es muy pequeña comparada con la de congelación. Esta es la base de la utilización del riego por aspersión para la protección contra heladas que por lo general requiere pluviometrías más bajas (ca. 1 mm/hora) que los sistemas de aspersión típicos para el suministro de agua para el cultivo. Se debe suministrar agua de modo continuo a todo el área a proteger, de modo que siempre haya una capa delgada de agua sobre el hielo que se forma, manteniendo así la temperatura en el punto de congelación. El riego de superficie también puede ser usado y también se basa en los mismos principios (uso de el calor de fusión y del calor específico del agua), pero el calor se libera al aire cerca de la superficie del suelo, y puede que no sea suficiente para evitar los daños por heladas.

BIBLIOGRAFÍA

Haan CT (1979) Risk analysis in environmental modifications. In: Barfield BJ, & Gerber JF (eds) Modification of the Aerial Environment of Crops. Amer Soc Agric Engin (ASAE), Monograph No. 2. St Joseph, MI pp 30-51

Rosenberg NJ, Blad BL, Verma SB (1983) Microclimate: the Biological Environment. John Wiley and Sons, Hoboken NJ

Snyder RL, de Melo-Abreu JP (2005) Frost protection: fundamentals, practice and economics, vol 1, FAO, Rome

Snyder RL, de Melo-Abreu JP, Matulich S (2005) Frost protection: fundamentals, practice and economics, vol 2, FAO, Rome

Capítulo 30

El control de las malas hierbas y otros factores bióticos

F.J. VILLALOBOS
L. MATEOS
E. FERERES

RESUMEN:

Las malas hierbas son plantas cuya presencia es indeseable en un momento y/o lugar porque compiten con los cultivos por los recursos, deterioran la calidad del producto cosechado y pueden dificultar la recolección. Las especies más importantes de malas hierbas son plantas C4 perennes con propagación vegetativa. Por lo general, las malas hierbas son capaces de producir muchas semillas que a menudo presentan latencia, lo que genera un banco de semillas que germinan durante muchos años. Esto impide la erradicación de las malas hierbas y nos obliga a utilizar técnicas de control para mantener poblaciones de malas hierbas a niveles tolerables. Las malas hierbas se adaptan en unos pocos años al sistema de cultivo, y en particular, a los métodos usados para su control. Las técnicas de control incluyen el uso de herbicidas y las prácticas culturales, como el laboreo, el acolchado, la siega y la rotación de cultivos. El manejo del cultivo tiene un efecto importante en la incidencia de enfermedades y malas hierbas. El método de riego y la frecuencia de aplicación determinan la germinación de malas hierbas e influyen en la infección por patógenos del suelo o aéreos. El control biológico es eficaz con las malas hierbas invasoras y algunos insectos. La capacidad de las malas hierbas para evolucionar en respuesta a la presión de selección ejercida por las técnicas de control nos obliga a establecer estrategias a largo plazo (de manejo de malas hierbas) que deben basarse en un conocimiento detallado de la ecología de las especies de malas hierbas. Entonces deben alternarse diferentes tipos de control para mejorar la eficiencia del mismo.

30.1. INTRODUCCIÓN

El control de malas hierbas siempre ha sido una parte importante de las prácticas agrícolas y, a menudo se considera como parte de la agronomía. Tradicionalmente, sólo la escarda manual fue empleada específicamente para controlar las malas hierbas, pero muchas prácticas, como el laboreo, la quema y las rotaciones, contribuyeron de alguna manera a este control. En 1944, cuando fue introducido el 2,4-D como herbicida, apareció la Malherbología como una disciplina dentro de las técnicas de protección vegetal, aunque muy ligada a las técnicas de producción de los cultivos.

Se estima que no más de 250 especies se han convertido en malas hierbas importantes para la producción agrícola. En este capítulo vamos a revisar las principales características ecológicas de las malas hierbas y los métodos de control, con la excepción de los plaguicidas que se abordan en el capítulo siguiente. Para algunas técnicas específicas de control también vamos a hablar de su impacto sobre otros factores bióticos.

30.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS MALAS HIERBAS

Una mala hierba es una planta que crece donde no queremos, es decir, en el momento o el lugar equivocado. Esta es una definición relativa, ya que las semillas que quedan de un cultivo después de la cosecha pueden conducir a malas hierbas para el próximo cultivo. Sin embargo, las especies de malas hierbas más problemáticas suelen mostrar características especiales que permiten su dispersión y su persistencia en los sistemas agrícolas y aumentan su capacidad para competir con las plantas del cultivo.

30.2.1. La dispersión de las malas hierbas

Las malas hierbas utilizan los mecanismos de dispersión general de las plantas (viento, animales, agua, gravedad), pero también presentan entre sus estrategias de invasión la llamada antropocoria (dispersión por la acción humana). El comercio de productos agrícolas, semillas y otros materiales ha contribuido a la dispersión y homogeneización de las malas hierbas en todo el mundo. Las especies más dañinas se encuentran en muchos entornos y sistemas agrícolas de todo el mundo. La Tabla 30.1 muestra las especies de malas hierbas más importantes a nivel mundial. La mayoría de estas especies son perennes C4.

La invasión de un nuevo sitio se basa generalmente en un pequeño pero continuo flujo de propágulos transportados desde distancias cortas. Sin embargo, la estrategia de dispersión más eficaz de una población de malas hierbas se basa en adaptaciones que aseguran el retorno de sus semillas junto con las del cultivo en el momento de la siembra.

Tabla 30.1. Las diez especies de malas hierbas más dañinas a escala global. También se presenta el número de cultivos y países donde se considera una mala hierba importante.

	Especie (tipo de fotosíntesis)	Nombre común	#cultivos	#países	Ciclo	Propágulos
1	*Cyperus rotundus* (C4)	Juncia	52	92	Perenne	Rizomas con tubérculos
2	*Cynodon dactylon* (C4)	Grama	40	80	Perenne	Rizomas con estolones
3	*Echinochloa crus-galli* (C4)	Cola de caballo	36	80	Anual	Semilla
4	*Echinochloa colona* (C4)	Arrocillo	32	60	Anual	Semilla
5	*Eleusine indica* (C4)	Pata de gallina	46	60	Anual	Semilla
6	*Sorghum halepense* (C4)	Cañote	30	53	Perenne	Rizomas y semillas
7	*Imperata cylindrica* (C4)	Carrizo	35	73	Perenne	Rizomas
8	*Eichhornia crassipes* (C3)	Jacinto de agua	1		Perenne	Estolones
9	*Portulaca oleracea* (C4)	Verdolaga	45	81	Anual	Semilla, enraizamiento en nudos
10	*Chenopodium album* (C3)	Cenizo	40	47	Anual	Semilla

30.2.2. Persistencia de las malas hierbas

La persistencia de las poblaciones de malas hierbas a menudo es garantizada por la producción de un gran número de semillas por planta que a menudo exhiben mecanismos de latencia. Estos permiten que la germinación se extienda durante un período de tiempo (años) y aseguran la supervivencia de la población.

La comunidad de propágulos enterrados (banco de semillas del suelo) se compone de rizomas, estolones, bulbos y semillas de diferentes especies. Las semillas que entran en el suelo pueden estar latentes o entrar en latencia secundaria. Los factores más importantes para la germinación o liberación de la latencia son: el agua, la temperatura, la luz, NO_3, O_2 y CO_2.

La permanencia de alguna forma de latencia en las semillas enterradas es una ventaja adaptativa ya que permite el ajuste de la germinación de las semillas a las condiciones ecológicas favorables para la supervivencia de las plántulas.

La pérdida de latencia de la semilla en el suelo se produce especialmente si el contenido de agua y la aireación son adecuados. La germinación es muy sensible a la calidad de la luz (sistema fitocromo), especialmente a la que resulta de la radiación interceptada por la vegetación. Por lo tanto, mediante la detección de la calidad de la luz, la semilla no sólo recibe información acerca de la profundidad a la que está enterrada, sino que también puede detectar la presencia de otras plantas establecidas anteriormente, lo que podría limitar el crecimiento de la plántula. Aparte de eso, algunas especies responden a impulsos de luz cortos como los que la semilla puede experimentar durante una labor secundaria.

Otros factores que contribuyen a poner fin a la latencia de las semillas son una baja concentración de CO_2, una alta concentración de nitratos y la oscilación de la temperatura. Esta última permite a la semilla "detectar" su profundidad en el suelo ya que la amplitud de la temperatura disminuye con la profundidad. Una semilla enterrada que se somete a una variación de temperatura muy amplia es probable que se encuentre cerca de la superficie y en una zona libre de vegetación, ya que la presencia de esta última amortigua la variación de la temperatura del suelo.

Por otro lado, las malas hierbas a menudo muestran una gran capacidad de aclimatación y adaptación. En muchos casos, esto se asocia a los ciclos anuales, al reducido número de cromosomas y a la autopolinización o propagación vegetativa.

La fuerza selectiva más importante que actúa sobre las malas hierbas en los sistemas agrícolas es la acción humana, incluyendo el tipo, la profundidad y el momento de las labores, la fecha de siembra, el momento de aplicación y el tipo de herbicida, etc. Hay presiones selectivas que seleccionan genotipos de malas hierbas adecuados para pervivir en el sistema gracias a mecanismos ajustados de latencia y germinación, y, más importante, mediante similitudes con el cultivo en altura, tamaño de la semilla y fecha de madurez para garantizar la recolección conjunta con el cultivo. Está claro entonces que el principal determinante de la flora de malas hierbas en un área determinada serán los principales cultivos, además de las prácticas de manejo.

En algunos casos, además de fuerzas selectivas, el sistema proporciona información genética que puede contribuir a la evolución de la mala hierba (cruce entre malas hierbas y plantas del cultivo).

A diferencia de los insectos y hongos patógenos las poblaciones de malas hierbas no sufren cambios repentinos en la densidad de población debido a la amortiguación ejercida por el banco de semillas. Por lo tanto, las malas hierbas son por lo general un problema crónico, pero no epidémico, aunque la variabilidad es grande. Algunas especies con alto potencial reproductivo, pero con baja latencia de las semillas y baja persistencia en el suelo, tales como *Alopecurus myosuroides* (cola de zorra) son típicamente invasores oportunistas agresivos pero son fácilmente eliminados. Por el contrario, otras especies con bajo potencial reproductivo, pero con una elevada latencia en las semillas, como *Veronica hederifolia* (verónica), tienden a persistir y es difícil de alterar el tamaño de sus poblaciones. Estas diferencias en la dinámica de poblaciones de diferentes especies de malas hierbas tienen implicaciones para su control, que debería tratar de erradicar las poblaciones del primer tipo con medi-

das intensas a corto plazo mientras que se trataría de mantener poblaciones reducidas para el segundo tipo.

30.3. CLASIFICACIÓN DE LAS MALAS HIERBAS

De acuerdo con su ciclo de vida las malas hierbas se clasifican en:

- Anuales: que completan su ciclo de vida en un año. Podemos distinguir dos grupos:

  i) anuales de invierno, que germinan en el otoño y producen semillas en primavera o verano. Normalmente se encuentran en los cereales de invierno. Ejemplos: *Avena sterilis* (avena loca), *Sinapis arvensis* (mostaza silvestre).

  ii) anuales de verano que germinan en primavera y producen semillas en otoño. Ejemplos: *Amaranthus retroflexus* (bledo), *Portulaca oleracea* (verdolaga).

- Bianuales: requieren dos años para completar el ciclo, dedicando el primer año al crecimiento vegetativo y almacenamiento de hidratos de carbono (estado de roseta en muchas especies) y floreciendo en el segundo año.

  Ejemplo: Cardos

- Perennes: tienen ciclos de varios años; en algunos casos muestran reproducción vegetativa a partir de órganos (raíces, tallos, rizomas, estolones, tubérculos, bulbos) que permanecen latentes hasta que ocurren condiciones adecuadas para la brotación.

  Ejemplos: *Cyperus rotundus* (juncia), *Cynodon dactylon* (grama) y *Sorghum halepense* (cañote).

  Las malas hierbas también pueden clasificarse de acuerdo con el hábitat en el que se encuentran generalmente (cultivos, pastos, huertos o bosques, aguas superficiales, bordes de caminos y vertederos).

30.4. INTERACCIONES ENTRE EL CULTIVO Y LAS MALAS HIERBAS

Las malas hierbas siempre compiten por los recursos (agua, luz, nutrientes) y, a menudo muestran ciertas ventajas competitivas, tales como una alta densidad, una emergencia más temprana o un mayor vigor inicial. Algunos mecanismos morfológicos (plantas más altas, raíces más profundas) o fisiológicos (fotosíntesis C4, alelopatía) también pueden mejorar el crecimiento de malas hierbas cuando compiten con las plantas del cultivo.

Además de las pérdidas de rendimiento debidas a la competencia, las malas hierbas tienen otros efectos negativos, tales como obstaculizar la cosecha o degradar

la calidad del producto mediante la alteración del color, el olor, el sabor o la adición de toxinas.

En todos los casos el nivel de competencia y por lo tanto la pérdida de rendimiento será directamente proporcional al adelanto en la emergencia de las malas hierbas en relación con el cultivo, como se discute en el Capítulo 12. Por lo tanto, es difícil establecer relaciones generales entre el rendimiento del cultivo y la densidad de las malas hierbas (D_{pw}). Si usamos la ley del rendimiento recíproco (Capítulo 12), podemos calcular el rendimiento (kg/ha) como:

$$Y = \frac{10\ HI\ D_p}{b_1 + b_2 D_p + b_{2w} D_{pw}} \tag{30.1}$$

donde b_1 y b_2 son coeficientes empíricos que determinan la respuesta del cultivo a la densidad de plantas. El factor 10 en la Ec. 30.1 se utiliza para convertir g/m² a kg/ha. Ahora hemos añadido un término ($b_{2w}D_{pw}$) que incorpora la competencia de la mala hierba. Si el cultivo y la mala hierba son muy similares en forma y ciclo, los coeficientes b_2 y b_{2w} deben ser iguales.

Ejemplo 30.1.

Vamos a calcular el rendimiento de un cultivo de cereal en función de la densidad de malas hierbas. Vamos a asumir que:

b_1 = 0.01 planta/g , $b_2 = b_{2w}$ = 0.001 m²/g , HI = 0.4 y D_p = 200 plantas/m².

De acuerdo con la Ec. 30.1 el rendimiento se puede calcular como:

$$Y = \frac{10\ HI\ D_p}{b_1 + b_2 D_p + b_{2w} D_{pw}} = \frac{800}{0.01 + 0.20 + 0.001\ D_{pw}}$$

Los valores de rendimiento para densidades de malas hierbas de 0, 100 y 200 plantas/m² serían de 3810, 2581 y 1951 kg/ha.

Muchos estudios indican que los 30-40 días después de la emergencia son críticos para la determinación de las pérdidas de rendimiento debidas a las malas hierbas. Si el cultivo se mantiene limpio durante este período cualquier invasión posterior no causará una reducción del rendimiento, pero puede conducir a otros problemas (p.ej, de recolección). Por otro lado, si las malas hierbas se eliminan por completo al final de este período, la reducción del rendimiento debe ser pequeña.

30.5. UMBRAL ECONÓMICO

El umbral económico o umbral de acción para un determinado factor biótico es la densidad de ese factor a la que se debe aplicar el control. De lo contrario el factor llega-

rá a un nivel mayor de densidad (llamado Nivel de Daño Económico, EIL) en el cual el coste del control es igual a la pérdida económica debida a la reducción del rendimiento, la pérdida de calidad o las dificultades de recolección. Téngase en cuenta que si se excede el nivel de acción, habrá una pérdida económica. Para las malas hierbas el umbral de acción puede ser igual a EIL pero para insectos puede ser mucho menor si la población de insectos aumenta rápidamente. Utilizando la ecuación 30.1 podemos calcular la pérdida de rendimiento (YL, en kg/ha) debida a malas hierbas como:

$$YL = \frac{10\ HI\ D_p}{b_1 + b_2 D_p} - \frac{10\ HI\ D_p}{b_1 + b_2 D_p + b_{2w} D_{pw}} \tag{30.2}$$

Una diferencia importante entre las malas hierbas y otras plagas es que las malas hierbas tienen un efecto negativo para cualquier densidad, ya que siempre consumen recursos (agua, nutrientes). Otros factores bióticos (insectos) pueden no tener ningún efecto negativo sobre el rendimiento cuando las poblaciones son bajas.

Si el precio de venta de la cosecha es P_Y (euro/kg) y el coste del control de malas hierbas es C_H (euro/ha), entonces el umbral económico (tomado como igual a EIL) corresponde a una pérdida de rendimiento de C_H/P_Y. Usando la ecuación 30.2 podemos deducir que esa pérdida de rendimiento ocurre cuando la densidad de las malas hierbas es:

$$D_{pwu} = \frac{10\ HI\ D_p C_H}{b_{2w}\ Y_x\ (P_Y Y_x - C_H)} \tag{30.3}$$

donde Y_x es el rendimiento en ausencia de malas hierbas. Vemos que el umbral económico es directamente proporcional a la densidad de siembra y al coste de control de malas hierbas, mientras que es inversamente proporcional a la capacidad competitiva de malas hierbas (b_{2w}), al rendimiento y al precio de venta.

Ejemplo 30.1.

Utilizando los datos del Ejemplo 30.1 podemos calcular el umbral económico si el precio del grano es de 0.25 euro/kg y el coste de control de malas hierbas es de 150 euro/ha:

$$D_{pwu} = \frac{10 \cdot 0.4 \cdot 200 \cdot 150}{0.001 \cdot 810\ (0.25 \cdot 3810 - 150)} = 39\ plantas\ m^{-2}$$

En este caso no se deben tomar medidas de control a menos que el recuento de malas hierbas supere 39 plantas/m^2.

El umbral económico así definido es válido a corto plazo, ya que sólo afecta al cultivo actual. Valores más bajos de umbral económico resultarán si se tiene una perspectiva temporal más amplia. Por ejemplo, en las explotaciones de agricultura

orgánica en los Países Bajos los principales problemas de malas hierbas en algunos cultivos (p.ej, cebolla) se deben a las semillas de algunas plantas de malas hierbas que no habían sido controladas en el cultivo previo de trigo. Esto implica la necesidad de un control más intensivo de las malas hierbas durante la campaña de trigo a un coste mayor que el que necesitaría este cultivo.

Algunas especies (p.ej, *Chenopodium album)* son fáciles de controlar con herbicidas hormonales, pero difíciles de erradicar, debido a la larga persistencia de sus semillas. En estos casos podemos utilizar el umbral económico a corto plazo. En otras especies que son difíciles de controlar con herbicidas, pero tienen poca persistencia de las semillas (p.ej. *Avena sterilis)* es mejor aplicar medidas de control intensas utilizando un umbral económico a largo plazo.

El efecto de una densidad de malas hierbas dado en el rendimiento depende de muchos factores, en especial del momento de la emergencia de la mala hierba en relación con el cultivo. Además las malas hierbas pueden ir emergiendo gradualmente, lo que complica aún más la predicción de su capacidad para competir, dado también que existe mucha variabilidad espacial en la distribución de las malas hierbas en un campo. Por lo tanto las ecuaciones empíricas entre el rendimiento y la densidad de las malas hierbas tienen una validez limitada, y los umbrales económicos deducidos a partir de ellas, también.

El concepto de umbral económico puede ser difícil de aplicar a muchas situaciones ya que hay que conocer a priori el efecto de las densidades de los enemigos bióticos sobre el rendimiento. Sin embargo, sirve para ilustrar algunas ideas importantes en el control de enemigos bióticos. En primer lugar, los bajos niveles de población de un determinado factor biótico no tienen un efecto negativo sobre los beneficios del agricultor, es decir, la supresión completa de la plaga no suele ser la mejor alternativa, a menos que podamos garantizar la erradicación a largo plazo. En segundo lugar, la densidad de población tolerable depende de factores biológicos (capacidad competitiva de las malas hierbas, capacidad de daño de los insectos, respuesta de las plantas a los daños, etc.), agronómicos (p.ej, la densidad de siembra) y económicos (precio del producto, coste del control).

30.6. CONTROL DE ENEMIGOS BIÓTICOS

El control de los enemigos bióticos tiene como objetivo reducir sus poblaciones a niveles aceptables. La completa eliminación de las malas hierbas y sus semillas es cara y casi imposible debido al banco de semillas del suelo. Los fumigantes controlan nematodos, hongos, bacterias e insectos en el suelo, y malas hierbas (tanto semillas como plántulas en germinación). Su uso está limitado por su alto coste y los riesgos de toxicidad. Una opción menos agresiva que fumigar es la solarización del suelo en que una lámina de plástico transparente se coloca sobre la superficie del suelo después de regar, en verano. Las altas temperaturas (> 60ºC) y alta humedad que se genera por el tratamiento eliminan la mayoría de los enemigos bióticos hasta unos 30 cm de profundidad.

Como la erradicación de malas hierbas no es posible necesitamos mantener bajas sus poblaciones mediante la prevención de la entrada de nuevos propágulos al campo y la reducción de su población. La prevención se basa en usar semilla libre de propágulos de plagas y enfermedades y de virus, mantener limpia la maquinaria y conservar los márgenes de los campos libres de especies de malas hierbas que pueden albergar otras plagas o enfermedades.

30.6.1. El control mecánico

El laboreo en general estimula la germinación de semillas de malas hierbas en el suelo. Los principales efectos del laboreo sobre las plantas de malas hierbas emergidas se deben al entierro de la parte aérea (asimilación reducida), el daño mecánico sobre parte aérea y raíces y el desarraigo de la mala hierba que luego muere por desecación. El laboreo es eficaz contra las malas hierbas anuales, pero puede aumentar la infestación de plantas perennes por la rotura y la dispersión de los propágulos (rizomas, estolones) cuando el suelo está húmedo. El efecto del laboreo depende del tipo y profundidad del mismo; un pase profundo de vertedera es muy eficaz para matar las plantas mediante enterramiento, pero también promueve la transferencia de las semillas de las capas profundas a la superficie. El laboreo vertical actuará en su mayoría por daños mecánicas, pero tiene poco efecto sobre la distribución de las semillas.

En el pasado las únicas medidas disponibles para el control de malas hierbas en cultivos en crecimiento eran el arrancado, el gradeo y cavar con una azada. El arrancado es muy eficaz contra plantas anuales y de raíz pivotante pero puede no serlo si la planta es capaz de rebrotar a partir de segmentos de raíz. Por lo tanto su eficacia depende de la capacidad para eliminar la mayor cantidad del sistema radical, lo que es bastante difícil en plantas perennes.

El desbrozado reduce el crecimiento de las malas hierbas y es muy eficaz en la prevención de la producción de semillas. Sin embargo, usarlo como única medida de control selecciona genotipos rastreros o especies que escapan al control.

La quema de rastrojos o residuos de cultivos se ha utilizado desde la antigüedad no sólo para el control de malas hierbas, insectos y patógenos, sino además para facilitar la preparación del lecho de siembra. Sin embargo, la quema está siendo restringida en muchas áreas debido a varias desventajas (riesgo de incendios, contaminación por humos, pérdida de materia orgánica y nitrógeno). Las altas temperaturas matan a las plántulas y pueden matar o reducir la viabilidad de los propágulos de malas hierbas, insectos y hongos cerca de la superficie del suelo. Esto también se puede conseguir mediante la solarización como se discutió anteriormente. Otra posibilidad es quemar las malas hierbas usando un quemador que dirige la llama a la mala hierba por un período corto, lo que provoca la muerte de la planta después de algún tiempo y es muy eficaz en plántulas de malas hierbas.

La inundación impide la germinación de semillas y mata las plantas sumergidas. Es la medida básica de control de malas hierbas en cultivos de arroz con inundación continua.

Los acolchados opacos evitan la germinación de semillas y matan a las malas hierbas por privación de carbono. Para eso se pueden utilizar láminas de plástico negro o gris o gruesas capas de otros materiales (grava, arena, serrín).

30.6.2. Otras técnicas de control

El manejo del cultivo afecta a las poblaciones de malas hierbas de muchas formas complejas. La rotación de cultivos puede ayudar a reducir los problemas de malas hierbas, p.ej, alternando cultivos de invierno y primavera. Las rotaciones son también muy eficaces para reducir la incidencia de enfermedades del suelo. La gestión de los residuos desempeña también un papel importante en el control de plagas ya que sirven como reservorio para los propágulos de los enemigos bióticos.

El manejo del riego también afecta a los factores bióticos. La germinación de las malas hierbas no se producirá en suelo seco, y por lo tanto el humedecimiento parcial de la superficie o el riego subterráneo serán útiles. Por otra parte se puede usar riego por aspersión antes de sembrar para inducir la germinación de las malas hierbas que son controladas a continuación, utilizando herbicida o una labor poco profunda. Este sistema se llama de falso lecho de siembra. Algunos hongos patógenos del suelo son favorecidos por el humedecimiento continuo del suelo, por lo que reducir la frecuencia del riego puede ser una medida de control eficaz. El humedecimiento de la parte aérea promueve la infección por enfermedades fúngicas aéreas (p.ej, royas), pero puede ayudar en el control de otras plagas (p.ej, ácaros).

La selección de genotipos adecuados puede ayudar en la mejora de la capacidad competitiva del cultivo. En el caso de enfermedades aéreas el uso de genotipos resistentes es una de las principales alternativas para el control (véase 30.7). Se han desarrollado cultivares que son organismos modificados genéticamente (OMG) que incluyen resistencia a ciertos herbicidas (p.ej, soja resistente a glifosato) lo que permite la aplicación del herbicida específico a las zonas de campo donde aparecen malas hierbas después de que el cultivo se ha establecido. En otros casos, se han insertado genes de bacterias *(Bacillus thuringiensis)* que codifican una toxina en los cultivares de algunos cultivos importantes tales como maíz y algodón, y estos cultivares producen la toxina Bt que mata larvas de *Lepidoptera* que se alimentan del cultivo. En todos los casos, los costes de control de malas hierbas e insectos se han reducido considerablemente con los cultivares OMG.

La densidad de plantación también afecta a la incidencia de las plagas. Por un lado una alta densidad de siembra puede compensar las pérdidas de plantas debidas a plagas o enfermedades. Por otro lado, los cultivos con alto LAI sufren un microambiente más húmedo y se mantienen húmedos durante más tiempo después de ser humedecidos lo que aumenta la incidencia de patógenos aéreos.

El control biológico consiste en la introducción de organismos que son consumidores, plagas o enfermedades de otras plagas. El agente no debe afectar al rendimiento y debe ser capaz de adaptarse con éxito en el área en la que se introduce. El ejemplo más famoso de control biológico de malas hierbas fue el de *Opuntia stric-*

ta en Australia que fue controlada con éxito utilizando una polilla *(Cactoblactis cactorum).* El control de insectos puede ser realizado por *Coccinellidae* (mariquitas) que se alimentan de pulgones y cochinillas.

El control químico es una de las principales alternativas para el control de plagas, enfermedades y malas hierbas y se considerará en detalle en el siguiente capítulo.

30.7. USO DE CULTIVARES CON RESISTENCIA A PLAGAS Y ENFERMEDADES

Una de las mejores alternativas para reducir el impacto de los insectos y las enfermedades es el uso de cultivares resistentes. Se distinguen dos tipos de resistencia:

a) resistencia cualitativa o vertical es la controlada por uno o varios genes, de forma que se encuentran cultivares resistentes y susceptibles. El uso continuo de la variedad resistente puede conducir a la aparición de una nueva raza del patógeno por lo que se pierde la resistencia, obligando al desarrollo de un nuevo cultivar resistente.

b) resistencia cuantitativa u horizontal es la controlada por muchos genes por lo que hay una variación continua en el nivel de resistencia de diferentes genotipos. Este tipo de resistencia sirve frente a muchas razas del patógeno por lo que dura mucho más que la resistencia vertical, pero es difícil de transferir entre los genotipos.

También podemos distinguir entre resistencia, si la plaga no infecta la planta huésped o la infección es muy limitada, y tolerancia, cuando se produce la infección, pero el impacto en el rendimiento es muy bajo.

Existen varias alternativas para reducir la presión de selección sobre el patógeno y por lo tanto prolongar la resistencia:

a) alternar cultivares resistentes y susceptibles en la rotación de cultivos.

b) sembrar una mezcla de cultivares resistentes y susceptibles.

c) usando una multilínea, que es un conjunto de cultivares con resistencia a diferentes razas del patógeno.

d) incluyendo la resistencia a diferentes razas en un solo cultivar.

Las opciones a y b no son muy atractivas para los agricultores, mientras que las opciones c y d requieren enormes esfuerzos de las empresas de mejora, así que al final los mejoradores mantienen la vigilancia sobre la aparición de nuevas razas patogénicas y desarrollan nuevos cultivares en una carrera sin fin contra la adaptación de los patógenos. Esto se conoce como mejora de mantenimiento y es esencial para la sostenibilidad de la agricultura, aunque no tiene una prioridad alta en la investigación agrícola de muchos países.

30.8. MANEJO DE MALAS HIERBAS

El manejo de malas hierbas es un conjunto de estrategias de control de malas hierbas destinadas a controlar sus poblaciones a largo plazo (años) en un sistema de cultivo. Se trata de un enfoque más amplio y a más largo plazo que el control de malas hierbas. Esta tecnología está basada en un mejor conocimiento de la ecología de las poblaciones de malas hierbas, sus períodos críticos para la formación de propágulos y sus interacciones con las prácticas culturales. Con esos conocimientos es posible diseñar estrategias a largo plazo para mantener las poblaciones en niveles aceptables desde el punto de vista de la producción de los cultivos. Por ejemplo, los modelos matemáticos de la germinación de las malas hierbas se pueden utilizar para ajustar las fechas del laboreo, de la aplicación de herbicidas o de la siembra de los cultivos antes de la emergencia de las malas hierbas.

Otro aspecto importante del manejo de malas hierbas es el desarrollo de estrategias a largo plazo que son necesarias si nos fijamos en las malas hierbas como un fenómeno a nivel de explotación o incluso a nivel del sistema agrícola. En este caso debemos estar preocupados por la producción y dispersión de propágulos. Por ejemplo, cuanto mejor sea la separación entre semillas del cultivo y de malas hierbas en la cosechadora, mejor será la dispersión de la mala hierba.

En las estrategias para el manejo a largo plazo también se debe tener en cuenta la evolución de las malas hierbas que puede ser muy rápida (varios años) en respuesta a la fuerte presión selectiva ejercida por las prácticas agrícolas (incluyendo herbicidas). Una opción interesante es alternar las medidas de control. Un ejemplo podría ser la aplicación de herbicidas durante varios años lo que conduce a una reducción de la variabilidad genética, que a menudo conduce a requisitos de temperatura muy estrictos para la germinación. Después de varios años podemos explotar las características de la población utilizando el laboreo en el momento adecuado o cambiando las prácticas culturales (p.ej, fechas de siembra). En esta segunda fase, la población de malas hierbas se selecciona a formas más amplias que incluyen una mayor sensibilidad a los herbicidas.

BIBLIOGRAFÍA

Pimentel D, Peshin R (2014) Integrated pest management. Pesticide problems. vol 3. Springer

Radosevich SR, Holt JS, Ghersa CM (2007) Ecology of Weeds and Invasive Plants: Relationship to Agriculture and Natural Resource Management (3rd ed) Wiley

Zimdahl RL (2013) Fundamentals of weed science (4th ed) Academic Press

Capítulo 31

La aplicación de herbicidas y otros plaguicidas

F.J. VILLALOBOS
E. FERERES

RESUMEN:

Las principales características de los plaguicidas a tener en cuenta desde el punto de vista agronómico son la selectividad, la movilidad dentro de la planta y la toxicidad para otros organismos. La aplicación de plaguicidas debe estar dirigida a maximizar el efecto protector al tiempo que se evita la deriva, que se incrementa con velocidad del viento alta, condiciones inestables y alta demanda evaporativa. Hay una tendencia general hacia el uso de plaguicidas con menor persistencia y un menor impacto sobre el entorno. Las dosis de plaguicidas para árboles se pueden ajustar según el volumen de copa (método TRV). En el caso de cultivos anuales, la dosis puede ser calculada como una función del índice de área foliar.

31.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se discuten los tipos de productos químicos que normalmente se aplican a los cultivos y los factores ambientales a considerar para su aplicación. Los principales tipos de productos fitosanitarios o plaguicidas utilizados en la agricultura son herbicidas, insecticidas y fungicidas para el control de malezas, insectos y hongos patógenos, respectivamente. El término plaguicida también incluye otros productos que no ejercen control, como los defoliantes, los desecantes y los reguladores del crecimiento (Tabla 31.1).

El uso de plaguicidas es casi tan antiguo como la agricultura, siendo el azufre elemental el primer plaguicida conocido, ya que fue empleado por los sumerios para controlar insectos y ácaros hace aproximadamente 4500 años.

Tabla 31.1. Clasificación de los plaguicidas de acuerdo con el organismo objetivo.

Tipo de plaguicida	Objetivo
alguicida	algas
avicida	aves
bactericida	bacterias
fungicida	hongos
herbicida	malas hierbas
insecticida	insectos
acaricida	ácaros
molusquicida	caracoles, babosas
nematicida	nematodos
piscicida	peces
rodenticida	roedores
reguladores del crecimiento	
desecantes	
defoliantes	

31.2. LOS PLAGUICIDAS

En general, una pequeña cantidad de materia activa (m.a.) del plaguicida tiene que ser aplicado uniformemente sobre una gran superficie. Para mejorar la distribución y la uniformidad de aplicación, el ingrediente activo se incluye generalmente en una formulación, que combina el ingrediente activo con excipientes, y otros ingredientes para alargar la vida útil, mejorar la dispersión en agua y evitar la aglutinación (en productos sólidos). El tipo de formulación puede afectar a la toxicidad, a la persistencia y a la velocidad de liberación.

La concentración de materia activa en una formulación puede ser expresada como % en peso (% p/p) o g/100 g de sólidos. Para líquidos hay varias alternativas: % en peso (% p/p), g/100 g, % en volumen (% v/v), g/100 cm^3 o g/L.

Los plaguicidas pueden ser presentados como líquidos (soluciones o suspensiones) o sólidos (polvo o gránulos). Pueden aplicarse con barras de aplicación o dispensadores, ya sea sobre toda la superficie, o localizados sobre sólo una fracción de la misma.

Es común utilizar mezclas de plaguicidas para ampliar el rango de acción (controlar un mayor número de especies), ahorrar aplicaciones y en algunos casos producir sinergismo (la acción de un plaguicida aumenta el efecto de otro). La compatibilidad es la posibilidad de mezclar dos plaguicidas sin reducir su eficiencia.

De acuerdo con su movilidad en la planta, los plaguicidas pueden ser sistémicos cuando se absorben y se translocan dentro de la planta o de contacto cuando afectan sólo a la parte de la planta en contacto con el producto químico.

También podemos clasificar los plaguicidas de acuerdo con su persistencia (residual o no residual) o su selectividad (selectivo frente a no selectivo) en función del número de especies afectadas.

31.3. APLICACIÓN DE PLAGUICIDAS

La mayoría de los plaguicidas se aplican pulverizando formulaciones líquidas, pero otros métodos también pueden ser utilizados (Tabla 31.2), como cebos, fumigantes, polvos o mediante adición al agua de riego. Los métodos de pulverización pueden clasificarse en función de la dosis aplicada (VAR, L/ha) (Tabla 31.3).

Tabla 31.2. Clasificación de los plaguicidas de acuerdo con la presentación.

Nombre	Descripción	Ventajas	Desventajas	Uso típico	Aplicado como
Sólidos					
Cebo	Mezcla de m.a. y alimento que atrae a las plagas. Hecho como harina, pellets o líquido	Fácil de aplicar manualmente y localizado. Listo para usar	Riesgo para animales domésticos y fauna	insectos, roedores, aves, babosas	sólido
Polvo	Partículas inertes finamente molidas (p.ej., talco) con 1-10% de m.a.	Listo para usar. No hay que mezclar	Visible en las plantas. Riesgo de inhalación y deriva	Tratamiento localizado o de semillas	sólido
Gránulos y pellets	Materiales inertes secos (p.ej. mazorca de maíz) con 2-25% de m.a.	Listo para usar. No requiere mezcla. La deriva es mínima.	Puede ser comido por las aves. Pueden necesitar la incorporación.	Tratamiento del suelo para el control de insectos o malas hierbas. Cebos	sólido

Fertilizante impregnado	Abono granulado que contiene una baja concentración de plaguicida	Aplicación conjunta	Se necesitan equipos especiales	Aplicación en el suelo	sólido
Polvo soluble	Polvo seco o gránulos que se disuelven en agua para preparar la solución de pulverización. A menudo > 50% m.a.	La agitación no es necesaria después de la mezcla.	Peligrosos si se inhalan	En su mayoría son aerosoles para el control de insectos y malas hierbas. Pocas formulaciones disponibles	sólido
Polvo humectable	Ingrediente inerte finamente molido con> 50% m.a. que forma una suspensión en el agua	Menos riesgo que el concentrado emulsionable	Peligrosos si se inhalan. Polvoriento.	Aerosoles para insectos, enfermedades y malas hierbas.	líquido
Gránulos dispersables en agua	Mezcla de m.a. en gránulos de material inerte. Forma una suspensión en agua	Menos polvo y menor riesgo de inhalación	La mezcla requiere agitación	Aerosoles para insectos, enfermedades y malas hierbas.	líquido
Líquidos					
Aerosol (A)	Por lo general, contienen pequeñas cantidades de m.a. y un disolvente orgánico	Baja concentración de m.a.	Peligro de inhalación.	Invernaderos	gas
Concentrado emulsionable	Contiene m.a., solvente orgánico, y emulsionante. Se suspende en la solución que es de color lechoso	Alta concentración de m.a. Fácil mezcla	Cantidad de m.a. aumenta el peligro de la mezcla	Aerosoles para insectos, enfermedades y malas hierbas.	líquido
Fluido	Partículas finamente molidas en suspensión en un vehículo líquido inerte. Forma una suspensión en la mezcla	Sin polvo	El caldo necesita agitación constante	Aerosoles para todos los tipos de plaguicidas	líquido
Gel	Concentrado emulsionable semi líquido	Se utiliza con envases solubles en agua.		Herbicidas e insecticidas.	líquido
Materiales micro-encapsulados	Plaguicida rodeado de un revestimiento de plástico. Se aplica mezclado con agua	Peligro reducido. Fácil de mezclar y aplicar.	La agitación es necesaria. Alto riesgo para las abejas	Insecticidas y aerosoles de feromonas.	líquido
Solución	M.a. disuelta en un líquido. Forma una solución	Se mezcla fácilmente.	La alta concentración de m.a. aumenta el peligro	Pulverización de herbicidas	líquido

Ultra-concentrado para bajo volumen o concentrado listo para aplicar	Líquido con concentración muy alta de m.a. que se utiliza tal cual o ligeramente diluido	Requiere poca o ninguna mezcla. Pocas formulaciones disponibles.	Requiere equipos de aplicación especial.	Pulverizaciones de insecticidas dentro de invernaderos	líquido
Gases					
Fumigantes	Líquido volátil o sólido empaquetado para liberar un gas tóxico	Amplio espectro. Buena penetración en estructuras y suelos	Altamente tóxico. El área tratada debe ser sellada	Invernaderos, graneros. Tratamiento del suelo antes de la siembra	gas
Paquete					
Paquetes solubles en agua	Cantidad previamente pesada de polvo humectable o soluble en bolsa de plástico que se disuelve en agua	Seguro y fácil de usar		Aerosoles para insectos, enfermedades y malas hierbas.	líquido

Tabla 31.3. Clasificación de los métodos de pulverización de acuerdo con el volumen de pulverización aplicada.

	Arboles y arbustos	Cultivos anuales
	Dosis (L/ha)	
Alto volumen	> 1000	> 700
Medio volumen	500-1000	200-700
Bajo volumen	200-500	50-200
Muy bajo volumen	50-200	5-50
Ultrabajo volumen	<50	<5

La aplicación por pulverización es un proceso relativamente complejo que puede ser dividido en una fase de transporte y otra de interacción con la superficie a tratar. Un conjunto de gotitas, que se caracteriza por una distribución de diámetro y una velocidad inicial, se libera de la boquilla a una altura dada. Estas gotitas sufren una fuerza vertical, resultante de las fuerzas de gravedad y fricción, y una fuerza horizontal (deriva del viento) que determinan la trayectoria y por lo tanto el punto de caída. Durante el transporte, las gotas sufren evaporación de modo que el diámetro disminuye. La velocidad de caída disminuye a medida que lo hace el diámetro de las gotitas. Las gotitas muy pequeñas pueden permanecer prácticamente suspendidas en el aire y caer muy lentamente, lo que aumenta el desplazamiento horizontal y, por tanto, la deriva.

La fase de interacción es la que se produce cuando las gotas llegan a la superficie. Si la gota es demasiado grande, tiende a rebotar o drenar hasta el suelo. Las gotas pequeñas es probable que se adhieran a las superficies de los cultivos.

Por lo tanto, el diámetro óptimo de la gota está generalmente en el rango de 150 a 250 micras dependiendo del tipo de producto (Tabla 31.4). La densidad de los impactos requeridos también depende del tipo de producto. Por ejemplo, los fungicidas no sistémicos e insecticidas de contacto preventivos para plagas muy móviles requieren una cobertura completa de los órganos de la planta y por lo tanto una densidad muy alta de impactos. En el caso de los insecticidas que son tóxicos por ingestión de insectos altamente móviles la densidad requerida será mucho menor.

Tabla 31.4. Parámetros deseados para la pulverización de las principales tipos de plaguicidas. El volumen de pulverización para LAI = 1 se ha calculado para condiciones casi óptimas (10% de pérdida por deriva y 10% no interceptado por el cultivo).

		Diámetro de gota requerido	**Densidad de impactos**	**Dosis para LAI= 1**	**Principal preocupación**
Plaguicida	Tipo	µm	cm^{-2}	L/ha	
Herbicida	Contacto	300	60	106	Deriva
Herbicida	Sistémico	700	20	449	Deriva
Fungicida	Contacto	150	60	27	Superficie humedecida
Fungicida	Sistémico	250	20	20	
Insecticida	Contacto	200	60	63	Número de impactos
Insecticida	Sistémico	350	20	56	
Fertilizante		> 1500			

31.4. DERIVA

La deriva es un efecto secundario del uso de plaguicidas que ocurre tanto en aplicaciones aéreas como terrestres y es un importante problema ambiental. La deriva es el movimiento no controlado en el aire de gotitas de pulverización, vapores o partículas de polvo, fuera del punto de aplicación previsto, lo que reduce la dosis real aplicada. La deriva puede causar daño a otras plantas y animales, y tiene el potencial de contaminar zonas próximas al campo tratado, en especial, aguas superficiales, cultivos sensibles, naves, áreas pobladas y cultivos en floración con abejas.

Cualquier aplicación de plaguicidas puede producir cierta cantidad de deriva. La cantidad real dependerá de la formulación del material aplicado, del método de aplicación, del volumen utilizado y de las condiciones meteorológicas durante la aplicación.

La deriva de los plaguicidas es generalmente mayor cuando la altura de la aplicación es grande (p.ej. aplicación aérea) por lo que se recomienda no exceder 1.2 m (por encima del cultivo) para aplicaciones terrestres. La deriva también es más importante cuando las partículas son ligeras (p.ej. polvos, aceites de baja volatilidad)

o las gotas son pequeñas. Para pulverizar, el tamaño de gota aumenta con la abertura de la boquilla y disminuye con la presión. Las gotas con un diámetro inferior a 100 micras favorecen la deriva por lo que se recomienda el rango de 150-200 micras. Los espesantes reducen la frecuencia de gotas pequeñas.

Los fumigantes y las formulaciones muy volátiles pueden producir vapores que flotan a la deriva con facilidad. La vaporización (volatilización) es proporcional a la demanda evaporativa e inversamente proporcional al tamaño de gota. Los aerosoles a base de agua se volatilizan más rápidamente que los aerosoles a base de aceite. Sin embargo, los aerosoles a base de aceite pueden desplazarse más lejos porque son más ligeros, especialmente a altas temperaturas.

Para minimizar la deriva es mejor trabajar en condiciones de baja demanda evaporativa (temperaturas inferiores a 32-35ºC), y poco viento (1-2 m/s) con dirección constante y en condición atmosférica neutra. Estas condiciones suelen producirse por la mañana temprano y por la tarde. Las condiciones inestables favorecen la elevación de las gotitas y, por tanto, el desplazamiento horizontal. En condiciones estables (inversión térmica) se forma una nube altamente concentrada que pueden moverse fuera del área a tratar. Esto es muy arriesgado para los herbicidas, pero podría ser más aceptable para los insecticidas o fungicidas. La pulverización de plaguicidas, especialmente herbicidas, debe evitarse para condiciones de viento en calma (velocidad del viento por debajo de 1 m/s) y también para condiciones ventosas (por encima de 2.5-3 m/s). Téngase en cuenta que la inestabilidad atmosférica añade turbulencia térmica a la turbulencia mecánica debida al viento por lo que para cualquier velocidad del viento las condiciones para pulverizar empeoran a medida que aumenta la inestabilidad.

La aplicación de plaguicidas también debe evitarse cuando se espera que llueva a corto plazo. La dirección del viento debe ser considerada para analizar el riesgo de que la deriva llegue a las zonas sensibles. En caso necesario habrá que establecer franjas de seguridad no tratadas.

31.5. PERSISTENCIA DE LOS PLAGUICIDAS

La persistencia de los plaguicidas es importante ya que determina la duración del efecto protector y el período de seguridad en términos de la recolección del cultivo después de la aplicación. La persistencia de un herbicida determina la posibilidad de sembrar a continuación un cultivo sensible en el mismo campo.

La degradación de los plaguicidas es causada por:

- Descomposición microbiana por lo que las condiciones que favorecen la actividad microbiana contribuyen a la degradación del plaguicida.
- Descomposición química por oxidación, reducción o hidrólisis.
- Fotólisis, es decir, la degradación química debido a la absorción de la luz por el producto.

Los plaguicidas también se pueden inmovilizar en el suelo (adsorción por los coloides del suelo). La mayoría de la adsorción se produce con coloides orgánicos, por lo que los suelos con alto contenido de materia orgánica o arcilla requerirán mayores dosis de herbicida.

Los plaguicidas pueden perderse por lixiviación o volatilización. La lixiviación depende de su solubilidad y su adsorción a los coloides. Para evitar la volatilización, los productos más volátiles deben ser incorporados en el suelo. Los herbicidas residuales (p.ej. atrazina) pueden causar serios problemas ambientales a medida que se acumulan en el agua subterránea después de su lixiviación lo que ha llevado a su prohibición en algunos países (p.ej. la atrazina fue prohibida en la Unión Europea en 2004).

31.6. LOS HERBICIDAS

31.6.1. Características generales

Los herbicidas son productos fitotóxicos. Pueden clasificarse como totales o selectivos, cuando afectan a todas o algunas de las especies. En términos de momento de la aplicación podemos distinguir entre presiembra, preemergencia y postemergencia (en referencia al cultivo) y en términos de movilidad tenemos herbicidas sistémicos y de contacto.

La dosis de herbicida a aplicar depende de su fitotoxicidad para las malas hierbas y el cultivo, y de la densidad de malas hierbas.

Los herbicidas pueden ser absorbidos por las raíces, las hojas o los tallos. La absorción foliar se incrementa mediante la adición de agentes mojantes. La absorción de los herbicidas polares es más eficaz por las raíces que por las hojas. Los herbicidas interfieren con algún proceso metabólico de la planta (la fotosíntesis, la respiración y metabolismo de los ácidos nucleicos y proteínas). Los síntomas visuales de daños por herbicidas incluyen la reducción del crecimiento, la malformación de las hojas y el marchitamiento de la planta.

La translocación de herbicidas sistémicos puede seguir dos caminos. Si es absorbido por las raíces, el herbicida pasa al xilema, y luego se distribuye por el flujo de savia. Si es absorbido por las hojas se mueve a través del simplasto hasta el floema, y luego se transporta a los tejidos en crecimiento.

31.6.2. La selectividad de los herbicidas

La selectividad de un herbicida implica su capacidad para controlar las malas hierbas sin causar daños importantes en el cultivo. La selectividad depende de varios factores:

a) Planta: la sensibilidad es mayor en las plantas jóvenes y de rápido crecimiento. La sensibilidad más alta en las plántulas se debe a su cutícula más delgada. La

morfología de la planta puede ser responsable de la selectividad. Puede ser debida por ejemplo a las diferencias entre el cultivo y la mala hierba en el sistema radical o en la ubicación de los órganos sensibles como el meristemo apical.

b) Clima: la selectividad de herbicidas de absorción foliar se reduce a altas temperaturas. Sin embargo, en estas condiciones, la tasa de degradación del herbicida en la planta es más alta, lo que ayuda a reducir sus efectos negativos. En condiciones de alta humedad y/o contenido de agua en el suelo las cutículas de las hojas tienen un mayor grado de hidratación, lo que facilita la absorción foliar del herbicida y puede aumentar el daño potencial para el cultivo.

c) Suelo: la textura y el contenido orgánico determinan el grado de fijación del herbicida a los coloides del suelo y por lo tanto la concentración de materia activa en la zona radical.

La alta sensibilidad de las plántulas es la base de la técnica de dosificación dividida que consiste en realizar una serie de aplicaciones de post-emergencia en pequeña dosis cuando las malas hierbas están emergiendo de modo que el cultivo apenas sufre sus efectos, mientras que las plántulas de malas hierbas mueren. Los principales grupos de herbicidas y sus características se presentan en la Tabla 31.5.

Tabla 31.5. Clasiificación de los herbicidas de acuerdo con sus características principales.

1	2	3	4	5	6	7	8
Inhibidores del fotosistema II	Triazinas (p.ej. atrazina), ureas (p.ej. Diuron)	S, Lf	temp., localización, metabolismo	Lf	Ap	M-A	B
Inhibidores del fotosistema I	Benzotidiazoles (Ej. Bentazón)	Lf	metabolismo	Lf	No	B	B
Inhibidores de la síntesis de membrana	Bipiridilo (Ej. diquat, paraquat)	Lf	temp., localización, metabolismo	tejido verde	No	Nula	A
Alteradores de membrana	Difenil-éter, dinitrofenoles	Lf	pubescencia	tejido verde	No	B	M
Inhibidores de la síntesis de aminoácidos (selectiva)	Sulfonilureas	Lf	metabolismo	enzimas	Ap, Sy	M-A	B
Inhibidores de la síntesis de aminoácidos (no selectiva)	Derivados de aminoácidos (Ej. Glifosato)	Lf	localización, genotipo	enzimas	Sy	B	B
Inhibidores de la síntesis de lípidos	Derivados de ariloxifenoxipropionato y ciclohexano	Lf	no afectan a dicotiledóneas	meristemo	Sy	Nula	M
Reguladores del crecimiento	Ácidos fenoxi-carboxílicos (p.ej., 2,4-D), ácido benzoico, piridinas	S, Lf	no afecta a las monocotiledóneas	auxinas	Ap, Sy	V	M

Inhibidores de la división celular	Dinitroanilinas (p.ej. Trifluralina)	S	localización	tejido en contacto	No	V	M
Inhibidores de la síntesis de proteínas	Cloroacetamida y tiocarbamatos	S	localización, metabolismo	plántulas	Pequeño	M-A	M
Inhibidores de la síntesis de pigmentos	Piridinonas	S	localización, metabolismo	cloroplasto	Ap	M-A	B

1: Tipo de herbicida
2: Grupos químicos
3: Actividad — S: suelo, Lf: Hoja
4: Bases para la especificidad
5: Sitio de acción — Lf: Hoja
6: Translocación — Ap: apoplasto, Sy: simplasto
7: Persistencia — B: baja, M: media, A: alta, V: Variable
8: Toxicidad — B: baja, M: media, A: alta

31.7. LOS INSECTICIDAS

Los insecticidas son agentes que controlan insectos matándolos o evitando sus conductas destructivas. Los insecticidas pueden ser naturales o artificiales y se aplican en una amplia gama de formulaciones y sistemas de aplicación (aerosoles, cebos, difusión de liberación lenta, etc.). Algunos genotipos OMG incorporan genes bacterianos que codifican la síntesis de proteínas insecticidas.

La Tabla 31.6 muestra una clasificación de los insecticidas de acuerdo con varios criterios.

Tabla 31.6. Clasificación de los insecticidas de acuerdo con sus características principales.

Tipo	Efecto principal sobre los insectos	Toxicidad para otros organismos	Objetivos principales
Organoclorados	Sistema nervioso	Alta	Amplio espectro
Organofosforados	Sistema neuromuscular	Muy alta	Amplio espectro
Organosulfurados	Ovicida	Muy baja	Acaros
Carbamatos	Sistema nervioso	Alta, en especial para peces	Amplio espectro
Formamidinas	Sistema nervioso	Media	Plagas resistentes a organofosforados y carbamatos
Dinitrofenoles	Síntesis de ATP	Leve-moderada	Retirado de uso
Compuestos orgánicos de estaño	Síntesis de ATP	Alta para la vida acuática	Ácaros en árboles
Piretroides	Sistema nervioso	Alta para peces	La mayoría de los insectos agrícolas
Nicotinoides	Sistema nervioso	Baja	Insectos chupadores, insectos del suelo, moscas blancas

Espinosinas	Sistema nervioso	Baja	Orugas, larvas de lepidópteros, minadores de hojas, trips
Pirazoles	Síntesis de ATP	Baja	Sila, pulgones, mosca blanca y trips
Piridazinonas	Transporte mitocondrial de electrones	Media para la vida acuática	Ácaros
Quinazolinas	Bloqueo de la síntesis de la quitina en la etapa larval	Media	Amplio espectro
Botánicos	Piretro-sistema nervioso	Baja	Piojos
	Nicotina-sistema nervioso	Baja	Pulgones y orugas
	Rotenona-inhibidor de enzimas respiratorias	Mayor para peces	Peces
	Limoneno-sistema nervioso	Baja	Pulgas, piojos, ácaros, garrapatas
	Neem- reduce la alimentación y altera la muda	Baja	Polillas y larvas de mariposas
Antibióticos	Bloquea el neurotransmisor GABA	Tóxico para peces y abejas	Arañuelos, minadores de hojas
Fumigantes	Actúan como narcóticos	Depende de compuesto	Depende del compuesto
Inorgánicos	Dependiendo del elemento	Depende de compuesto	Depende del compuesto (p.ej. azufre para los ácaros)
Biorracionales	Atrayentes, reguladores del crecimiento o endotoxinas	Muy baja	Muy específico
Benzoilureas	Reguladores del crecimiento de insectos	Algunos pueden afectar a otros invertebrados	Orugas y larvas de escarabajos

Antes de 1940 sólo se disponía de algunos insecticidas inorgánicos (p.ej. azufre) o botánicos (p.ej. piretro). Entonces apareció el primer insecticida orgánico de síntesis, el DDT, un organoclorado. Desde entonces la historia de los insecticidas ha sido una mezcla de éxitos (altos niveles de control a un coste reducido, desarrollo de productos más específicos con baja persistencia) y fracasos (p.ej. los organoclorados son tóxicos para los animales, se acumulan en la cadena trófica y tuvieron que ser prohibidos).

31.8. LOS FUNGICIDAS Y EL CONTROL DE LAS ENFERMEDADES

Las enfermedades de las plantas se controlan mejor mediante la integración de una serie de prácticas que incluyen la fecha de siembra, la densidad de siembra, la rotación de cultivos, la selección de cultivares (utilizando genotipos tolerantes o resis-

tentes a las enfermedades), los programas de riego y fertilización, la modificación del microclima y la aplicación de fungicidas.

El conocimiento del ciclo de la enfermedad del patógeno es importante en el desarrollo de los sistemas de predicción de enfermedades o para el cálculo de umbrales económicos. Los sistemas de predicción se basan en la temperatura y la humedad relativa o el humedecimiento de las hojas. Los programas basados en umbrales incluyen el monitoreo periódico de los síntomas (p.ej. número de manchas de enfermedad por hoja). Los aspectos importantes del ciclo de la enfermedad incluyen el número de generaciones por año del patógeno y el tiempo entre la infección y la aparición de los síntomas (período latente o de incubación) que puede ser de unas pocas horas para enfermedades aéreas hasta varias semanas para patógenos del suelo.

Los fungicidas son productos que matan o impiden el crecimiento de los hongos y sus esporas. Se pueden clasificar según diferentes criterios.

a) Movilidad en la planta

   Un fungicida de contacto es aquel que permanece en la superficie donde se aplica pero no entra en la planta y no tiene actividad después de la infección. Se necesitan aplicaciones repetidas para proteger el nuevo crecimiento y para reponer las pérdidas por la lluvia o el riego, o por la degradación causada por factores ambientales.

   Los fungicidas sistémicos son absorbidos por la planta y se mueven dentro de ella. Pueden ofrecer algún tipo de actividad después de la infección. Muy pocos fungicidas son verdaderamente sistémicos (el grupo de los fosfonatos) pero algunos presentan penetración acropétala (que se mueve hacia arriba en el xilema), y algunos presentan penetración local (es decir, se redistribuyen dentro de la hoja tratada).

b) La forma de protección (algunos fungicidas pueden pertenecer a más de una de las siguientes categorías)

   - Los fungicidas preventivos ofrecen una barrera protectora que previene la infección.
   - Fungicidas con actividad en infección temprana: el producto entra en la planta y detiene al patógeno, siendo generalmente eficaz hasta varios días después de la infección. Este tipo tiene también actividad preventiva y es más eficaz cuando se aplica antes de la infección.
   - Fungicidas para erradicación: algunos productos tienen la capacidad de detener el desarrollo de la enfermedad después de que los síntomas se hayan desarrollado. Incluso entonces el daño causado por la enfermedad en las plantas a menudo no desaparece.
   - Fungicidas con actividad anti-esporulante (capacidad de prevenir la formación de esporas). En este caso, la enfermedad continúa desarrollándose, pero

no se producen esporas, por lo que se reduce la cantidad de inóculo disponible para infectar las plantas de los alrededores.

c) Modo de acción

El modo de acción es cómo actúa el fungicida sobre el hongo a tratar, es decir, es el proceso específico en el metabolismo que se ve afectado (p.ej. dañar las membranas celulares, inactivación de enzimas críticos). Un fungicida de un solo sitio afecta sólo a un punto en una ruta metabólica o a una sola enzima o proteína crítica. Estos fungicidas son menos fitotóxicos y tienden a tener propiedades sistémicas, pero muestran un mayor riesgo de desarrollo de resistencia de los patógenos, ya que el modo de acción es tan específico que pequeños cambios genéticos en los hongos pueden superar el efecto del fungicida.

Por otro lado, un fungicida multi-sitio afecta a un número de sitios metabólicos diferentes dentro del hongo.

31.9. CÁLCULO DE LA DOSIS DE PLAGUICIDAS

El volumen mínimo de plaguicidas a aplicar o dosis (VAR, L/ha) puede calcularse como una función de la densidad de impactos deseado (N, impactos/cm^2) y el diámetro de gota (d, µm) como:

$$VAR = f(LAI)\frac{10^{-7}\,\pi}{6}\frac{d^3\,N}{1-p_s-p_d} \tag{31.1}$$

donde p_s y p_d son la probabilidad de que las gotas no sean interceptadas por el cultivo y la fracción de gotas perdidas por deriva, respectivamente. La función f(LAI) depende del tipo de plaguicida. Para los fungicidas de contacto y los insecticidas de contacto f(LAI) = 2 LAI, mientras que para los fungicidas e insecticidas sistémicos f(LAI) = LAI. Para herbicidas f(LAI) = 1. El mismo valor debe adoptarse si el valor calculado de f(LAI) es inferior a 1.

Ejemplo 31.1.

Queremos aplicar un fungicida de contacto en un cultivo de trigo con cobertura completa del suelo y LAI= 3. La densidad de impactos requerida es de 60 cm^{-2} y nuestro pulverizador genera gotas de un diámetro de 150 µm. Vamos a realizar la aplicación con buenas condiciones de pérdida por deriva (10%). Con cobertura completa, podemos suponer que casi todas las gotas serán interceptadas por el cultivo (p_s = 0.1). Con un fungicida de contacto tomamos f (LAI) = 2 LAI = 6. Por lo tanto:

$$VAR = f(LAI)\frac{10^{-7}\,\pi}{6}\frac{d^3\,N}{1-p_s-p_d} = 6\cdot\frac{10^{-7}\,\pi}{6}\frac{150^3\cdot 60}{1-0.1-0.1} = 80\;L\;ha^{-1}$$

31.10. CÁLCULO DE LA DOSIS DE PULVERIZACIÓN PARA ÁRBOLES FRUTALES

El sistema de volumen de fila de árboles (Tree-Row Volume, TRV) fue desarrollado para manzanos en seto en los Estados Unidos. En lugar de utilizar un volumen de caldo estándar (3741 L/ha = 400 gal/acre), el VAR se corrije en proporción al volumen de copa por unidad de área (TRV, m^3/ha):

$$VAR\ (L\ ha^{-1}) = 0.0937\ \cdot TRV \tag{31.2}$$

donde 0.0937 es el volumen (en litros) de caldo necesario para mojar 1 m^3 de copa (con baja densidad de área foliar). Este valor aumenta a 0.1337 L/m^3 para copas densas. Este mismo enfoque se puede aplicar también a las plantaciones donde las copas de los árboles no se superponen. Sin embargo, el factor específico de volumen por unidad de volumen puede cambiar para plantaciones de alta densidad o por diferencias en la anatomía de la hoja (p.ej. para la vid, 0.3 L/m^3).

Si la dosis recomendada de plaguicida es δ_p (kg m.a./ha) para un VAR estándar de 3741 L/ha, entonces la dosis a aplicar debería ser:

$$Dosis\ (kg\ m.a.\ ha^{-1}) = \frac{0.0937\ \cdot TRV\ \cdot \delta_p}{3741} \tag{31.3}$$

Ejemplo 31.1.

Una plantación de manzanos tiene árboles espaciados 7 x 5 m. Queremos aplicar un fungicida con dosis recomendada de 2 kg m.a./ha. El radio horizontal de los árboles es de 2.0 m y el radio vertical es de 1.5 m. Los árboles tienen una baja densidad de área foliar. El volumen de los árboles por unidad de área es:

$$TRV = \frac{\frac{4}{3}\pi \cdot 2 \cdot 2 \cdot 1.5}{7 \cdot 5} 10^4 m^2 ha^{-1} = 7181\ m^3 ha^{-1}$$

Por la baja densidad de área foliar el volumen de caldo es:

$$VAR = 0.0937\ \cdot TRV = \ 0.0937\ \cdot 7181 = 673\ L\ ha^{-1}$$

Y la dosis de materia activa:

$$Dosis\ = \frac{0.0937\ \cdot TRV\ \cdot \delta_p}{3741} = \frac{0.0937\ \cdot 7181\ \cdot 2}{3741} = 0.36\ kg\ m.a.\ ha^{-1}$$

BIBLIOGRAFÍA

Fernandez-Cornejo J, Nehring R, Osteen C, Wechsler SJ, Martin A, Vialou A (2014) Pesticide Use in U.S. Agriculture: 21 Selected Crops, 1960-2008. Econ Info Bull EIB-124, ERS-USDA

Furness GO, Magarey PA, Miller PH, Drew HJ (1998) Fruit tree and vine sprayer calibration based on canopy size and length of row: unit canopy row method. Crop Protection 17(8): 639-644

Matthews GA (1999) Application of pesticides to crops. Imperial College Press, London

Pimentel D (2005) Environmental and economic costs of the application of pesticides primarily in the United States. Environment, Development and Sustainability 7:229-252

Capítulo 32

Recolección y conservación

F.J. VILLALOBOS
E. FERERES

RESUMEN:

La recolección es la operación fundamental en la agricultura que culmina los esfuerzos de la campaña. Hasta hace poco representaba una fracción muy importante de la mano de obra utilizada en la agricultura y también en cuanto a costes de producción. Con la llegada de la cosechadora mecánica, los costes han disminuido drásticamente contribuyendo en gran medida a la reducción de los precios de los alimentos en las últimas décadas. La determinación del momento de la recolección es normalmente un compromiso entre factores que aumentan los beneficios (p.ej., el retraso supone una mayor biomasa) y el aumento de los riesgos (p.ej., peor calidad del producto o ocurrencia de mal tiempo). Hay pérdidas de rendimiento durante la recolección que deben evitarse y también las hay en post-recolección, en este caso relacionadas con las condiciones de almacenamiento. El secado de granos y su almacenamiento en condiciones de baja humedad relativa (HR), reduce la incidencia de enfermedades causadas por hongos que deterioran el producto. El contenido de agua de las semillas después de la recolección tiende a un valor de equilibrio en el almacén que depende de la humedad relativa y la temperatura del aire, y ese contenido de agua se puede determinar a partir de las Isotermas de Cesión de Humedad. Los cultivos forrajeros pueden ser consumidos directamente por los animales o segados y conservados mediante ensilado, henilaje o henificación, requiriendo cada proceso un mayor secado del material vegetal antes de su almacenamiento seguro. La recolección de frutas para el mercado de productos frescos se sigue haciendo a mano, pero las consideraciones de calidad son importantes en la determinación del momento de cosecha. La recolección de frutas y verduras para el procesado ha sido ampliamente mecanizada, pero la determinación del momento de cosecha se basa en un compromiso entre factores de calidad y objetivos de rendimiento y de comercialización.

32.1. INTRODUCCIÓN

La recolección es una actividad clave, ya que culmina todas las operaciones de cultivo que conducen al objetivo último de la agricultura, la producción de alimentos y la obtención de materiales útiles. La primera práctica agrícola en la historia fue la recolección. Mucho antes de que se iniciara la producción agrícola los humanos recolectaban las semillas de algunas especies de gramíneas como parte de una dieta variada. Estos cazadores-recolectores procesaban las semillas para la producción de cerveza y pan. Una gran ventaja de las semillas era la posibilidad de almacenamiento a largo plazo para su uso posterior, en contraste con el tiempo muy limitado que la carne de caza se podía conservar almacenada. La baja eficiencia de la recolección de semillas de poblaciones naturales donde las plantas útiles se encuentran dispersas, probablemente fomentó la idea de los cultivos agrícolas. Alguien debió de preguntarse: ¿y si este campo se ocupara sólo con la planta que quiero año tras año? ¿Qué pasaría si todas las plantas maduraran al mismo tiempo, con semillas más grandes que no cayeran de la planta antes de que yo las recoja? Por lo tanto, la recolección de las partes comestibles de plantas en ambientes naturales, probablemente, fue fundamental para la invención de la agricultura.

Los grandes avances en la productividad de los cultivos de las últimas décadas han ido a menudo asociadas a una reducción en los costes de recolección mediante la mecanización. En muchos casos, los costes de recolección limitan la viabilidad económica de los cultivos. Tradicionalmente la recolección se basaba únicamente en mano de obra con el apoyo parcial de animales de carga para la recogida y el transporte. La disponibilidad de mano de obra para la recolección a menudo limitaba la superficie de tierra cultivable. Por ejemplo, la recolección a mano de 1 ha de trigo requiere alrededor de 130 horas-persona de trabajo (13 días de 10 horas), mientras que la recolección mecanizada actual requiere sólo 0.4 horas-persona. Por lo tanto, si el tiempo disponible para la recolección está entre 30 y 60 días se deduce que una persona podría cosechar 2.3-4.6 ha manualmente o 750-1500 ha usando una cosechadora.

Una decisión importante para el agricultor es cuándo cosechar. La madurez fisiológica se define como el momento en el que la biomasa de la parte cosechada alcanza un máximo. Sin embargo, las mejores condiciones para la recolección (madurez de recolección) se pueden presentar mucho más tarde, ya que, en la mayoría de los casos, reducir aún más el contenido de agua del producto es beneficioso en términos de manejar menos peso y para reducir el riesgo de enfermedades fúngicas. En el caso de frutales hay que considerar también el grado de madurez que implica color, sabor y acumulación de productos secundarios. En el caso de muchas hortalizas la fecha de recolección no se puede asociar a la madurez fisiológica porque otras características especiales de calidad son la principal preocupación.

El método de recolección y las operaciones asociadas también afectan a otros componentes del sistema agrícola. Normalmente, el producto cosechado representa sólo una parte de la biomasa y el resto debe ser manejado de tal manera que contribuya al cultivo posterior y no interfiera con las operaciones de cultivo futuras. En realidad,

la gestión de los residuos de los cultivos tiene un impacto importante en el balance de materia orgánica y nutrientes del suelo y ofrece grandes oportunidades para contribuir a la conservación del suelo. La recolección también puede tener efectos adversos sobre el sistema agrícola, como la propagación de agentes patógenos, insectos y malas hierbas y la compactación del suelo debido al tráfico de la maquinaria utilizada.

32.2. OPERACIONES DE RECOLECCIÓN

La recolección puede afectar a toda la planta o sólo a una parte de ella. En este caso, el órgano cosechado puede ser aéreo o subterráneo (Tabla 32.1). Los residuos de los cultivos también pueden ser cosechados y exportados fuera del campo, ya sea por separado o todavía unidos a las partes útiles, para su posterior separación. En el mejor de los casos sólo los órganos útiles son exportados, mientras que los residuos de los cultivos permanecen en el campo.

Tabla 32.1. Clasificación de los productos cosechados en la agricultura según el uso final o el órgano cosechado.

Utilización		Órgano y productos cosechados	
Alimento	Fresco	Parte aérea	Vegetativa
	Transformación		Reproductiva (flores, frutos, semillas)
Forraje			Savia (p.ej. arce)
Productos industriales	Textil		Látex (p.ej. caucho, opio)
	Químicos (aceites, pinturas, barnices)		Resinas (p.ej. pino)
	Combustibles	Organos subterráneos	Raíces (p.ej., remolacha, zanahoria, yuca)
	Perfumería y cosmética		Bulbos (p.ej. cebolla)
	Farmacéutico		Tubérculos (p.ej. patata)
			Rizomas (p.ej. jengibre)
Semillas y propágulos para la agricultura			

Las decisiones sobre cuándo y cómo cosechar dependen del uso final del producto (Tabla 32.1). Por ejemplo, las hortalizas y frutas para consumo en fresco se reco-

gen normalmente a mano y la cosecha se puede realizar en varias pasadas conforme el cultivo madura.

Las operaciones involucradas en la recolección de los cultivos son variadas y dependen de la especie y su uso (Tabla 32.2). En la mayoría de los casos la recolección consiste en cortar una parte o el total de la planta y la separación de la fracción útil (p.ej. semillas) de los residuos. Estos dos procesos pueden ocurrir más o menos al mismo tiempo (p.ej. cosechadora de cereales) o las plantas cortadas se pueden dejar en el campo para el secado y luego son transportadas fuera del campo para la trilla y el aventado. Antes de cosechar puede ser necesario preparar el cultivo (uso de defoliantes o promotores de abscisión) y/o el suelo (compactación, riego, etc.).

Tabla 32.2. Algunas operaciones básicas en la recolección de diferentes cultivos

Operaciones de recolección	Cultivos
Siega	Forrajeros, medicinales
Siega, trilla y aventado	Cereales, legumbres, oleaginosas
Peinado, arrancado	Frutas
Cavado, levantado y carga	Tubérculos, raíces
Corte	Verduras
Cogida a mano	Frutas
Vibración, barrido, carga	Frutos secos, olivo

Después de cosechar, algunas operaciones posteriores se puede realizar en el campo/explotación o en el exterior, como el secado, la limpieza, la eliminación de partes de plantas, la clasificación por tamaño, etc.

Finalmente el producto cosechado puede ir directamente a la planta envasadora o al almacén, en el que se puede requerir el control de la aireación y/o la temperatura. Para los cultivos hortícolas se emplea normalmente una atmósfera controlada, es decir, con bajo nivel de oxígeno y una concentración de dióxido de carbono que ralentizan en gran medida la maduración del producto.

32.3. LAS PÉRDIDAS DE RENDIMIENTO DURANTE LA RECOLECCIÓN

No toda la biomasa de los cultivos sino sólo una parte (rendimiento, Y) es útil. La relación entre rendimiento y biomasa se definió como índice de cosecha en el Capítulo 13. Sin embargo, el rendimiento cosechado (Y_c) es siempre menor que Y (medido en la madurez fisiológica) debido a las pérdidas que ocurren:

a) Antes de la recolección, debido a:

- Respiración del órgano cosechable, que es proporcional al tiempo que está en el campo después de alcanzar la madurez, a su contenido de agua y a la temperatura.
- Pérdida de estructuras cosechables (dehiscencia de las vainas, abscisión de frutos, consumo por herbívoros, incendio, granizo, etc.).

b) Durante la recolección:

- Partes de la planta inaccesibles: p.ej. partes de la planta por debajo de la barra de corte.
- Partes no capturadas por el sistema de recolección o caídas por el mismo.
- Deterioro de estructuras cosechadas (granos partidos, frutos dañados).
- Baja calidad: aunque no es exactamente una pérdida, parte del rendimiento se puede dejar sin cosechar debido a la mala calidad o a costes excesivos de la recolección. Por ejemplo, un rendimiento muy bajo de grano puede no compensar el coste de la recolección mecánica.

c) Después de la recolección (durante el envasado, el transporte o el almacenamiento)

- Respiración del órgano cosechado: depende del contenido de agua y la temperatura
- Consumo o deterioro causado por plagas y enfermedades: dependen de las condiciones sanitarias de las instalaciones de almacenamiento y del contenido de agua y la temperatura del producto y de la humedad del aire.
- Partes desechadas por criterios de calidad en post-recolección: el producto cosechado (o una fracción del mismo) pueden incumplir con los estándares de calidad lo que implica una pérdida o un coste adicional para la clasificación y separación de los productos que no cumplen la norma.

Recuadro 32.1 El año sin verano

Las condiciones climáticas en 1816 se volvieron extremadamente frías como resultado de la erupción volcánica del Monte Tambora en Indonesia, que expulsó una enorme cantidad de ceniza a la atmósfera, reduciendo de este modo la transmisividad y la radiación global. Se estima que la temperatura media global disminuyó después de la erupción durante casi tres años entre 1.5 y 3ºC. Las fuertes lluvias y las bajas temperaturas durante el verano en Europa occidental provocaron el retraso en el desarrollo de muchos cultivos que no alcanzaron la madurez. Los que sí lo hicieron no pudieron ser cosechados en muchos casos, y cuando fueron cosechados el grano se perdió más tarde durante el almacenamiento. En aquella época, la agricultura de subsistencia era común y la gente en las ciudades vivía entre cosecha y cosecha dependiendo de unos sistemas

agrícolas frágiles que no producían suficientes alimentos. La escasez de alimentos fue dramática durante 1816 y los dos siguientes años, no sólo en Europa sino a nivel mundial. En Asia, los patrones del monzón se alreraron causando no sólo el hambre, sino además epidemias que mataron a millones de personas, mientras que la inestabilidad política se encontraba en un punto álgido en China.

32.4. OPERACIONES AGRÍCOLAS AFECTADAS POR LA RECOLECCIÓN

La recolección normalmente requiere la concentración de los esfuerzos de los agricultores y sus operarios lo que restringe la realización simultánea de otras operaciones agrícolas. La fecha y el método de recolección de un cultivo determinado determina las posibles opciones para el siguiente cultivo en la rotación. El método de recolección establece la cantidad y la distribución de los residuos en el campo, lo que determina la necesidad de operaciones adicionales (quema, picado, eliminación) y, por tanto, el tiempo necesario para preparar la tierra antes de sembrar el siguiente cultivo.

El riego puede ser utilizado para mejorar las condiciones del suelo antes de la recolección (p.ej. antes de cosechar tubérculos o raíces). El riego también puede ser interrumpido para promover la abscisión (de hojas o frutos) y para evitar la compactación del suelo debido al tráfico con suelo húmedo durante la recolección.

Algunas labores pueden ser necesarias antes de la recolección (p.ej. la compactación del suelo en superficie para facilitar el barrido de los frutos caídos después de vibrar un almendro). Los tratamientos fitosanitarios deben detenerse algún tiempo antes de la recolección para cumplir con los plazos de seguridad. En otros casos se aplican defoliantes (p.ej. algodón) para facilitar la recolección mecánica.

32.5. RECOLECCIÓN DE GRANOS Y SEMILLAS

Aunque existe cierto margen en la fecha de recolección, el retraso de la misma en los cereales de invierno permite reducir el contenido de agua del grano y la necesidad de secado, pero tiene efectos negativos por el aumento de:

- Pérdidas de materia seca y/o deterioro de la calidad del grano.
- Pérdidas de semillas por dehiscencia.
- Riesgo de deterioro por condiciones adversas (encamado, granizo) o de destrucción por incendios.
- Produccion de micotoxinas, esto es, sustancias químicas tóxicas producidas por mohos presentes en la naturaleza y algunos patógenos de plantas tales como *Fusarium.* El tipo más común es el de las aflatoxinas, generadas por los mohos *Aspergillus flavus* y *A. parasiticus.* La probabilidad de contaminación con aflatoxinas

es mayor cuando la recolección se retrasa durante tiempo húmedo o cuando el grano se cosecha con alto contenido de humedad y el secado se retrasa. Los cultivos sometidos a déficit hídrico son más susceptibles a la infección. La contaminación con aflatoxinas no sólo se produce en los cereales, sino también en otros productos agrícolas (semillas de girasol, nueces, yuca, algodón, especias, pimienta, heno). La recolección del maíz se puede retrasar más tiempo que la de los cereales de invierno, pero sólo si las condiciones climáticas son secas, reduciendo de esta manera los costes de secado sin correr el riesgo de contaminación por aflatoxinas.

En muchos casos, la recolección se lleva a cabo antes de alcanzar el contenido mínimo de agua necesario para el almacenamiento seguro, por lo que el contenido de agua de las semillas se debe reducir después fuera del campo. En las especies donde la dehiscencia es un problema (p.ej. colza), o cuando el tiempo es limitado, la recolección se realiza en dos etapas. La primera es la siega e hilerado, es decir, se corta el cultivo y se deja formando hileras donde se secarán durante 5-10 días hasta que se alcanza el contenido de agua deseado en las semillas, en cuyo momento ocurre la segunda etapa que consiste en la recogida y la trilla. En general, el grano se puede almacenar de forma segura cuando está limpio, seco, sano e intacto. Las condiciones mejoran si la temperatura es baja en el momento del almacenamiento.

El contenido de agua del grano afecta a (Tabla 32.3):

a) El riesgo de daño físico durante la recolección

b) La incidencia de plagas de insectos y enfermedades fúngicas

c) La actividad metabólica de la semilla, que afecta a su tasa de deterioro, a la liberación de oxígeno por la respiración y a la generación de calor en el almacén.

Tabla 32.3. Estado de las semillas de los principales cultivos agrícolas en función del contenido de agua

Contenido de agua g agua/g	Potencial de agua (MPa)	Estado de la semilla	Actividad de los factores bióticos	Degradación en condiciones de almacenamiento
> 0.41	> -1.5	Madurez fisiológica		
0.30-0.40	-5 a -1.5			
0.20-0.30	-11 a -5	Alta tasa de respiración	Alta (bacterias, hongos)	Rápida
0.13-0.20	-100 a -11	Alta resistencia mecánica (0.13-0.16)	Alta (insectos, hongos)	Rápida
		Lista para recolección mecanizada		

0.10-0.13	-120 a -100		Alta (insectos)	Lenta
<0.10	<-120		Baja	Lenta (puede aumentar con alta temperatura)

El contenido de agua de las semillas en almacenamiento después de la recolección tiende a un valor de equilibrio que depende de la humedad relativa (HR) y de la temperatura del aire. Estrictamente el equilibrio se alcanza cuando el potencial de agua es igual en el aire y en la semilla, que puede calcularse como

$$\Psi_{semilla} = -\frac{R\,T}{M_w}\ln a_w \tag{32.1}$$

donde $\Psi_{semilla}$ tiene unidades de J/kg (o kPa), R = 8.3143 J/mol/K, T es la temperatura del aire (K), M_w = 0.018 kg/mol y a_w es la actividad de agua, que es equivalente a la humedad relativa de equilibrio dividida entre 100. Por lo tanto, para una temperatura y humedad relativa dadas el grano alcanzará un contenido de agua de equilibrio (EMC). Esta relación se llama isoterma de humedad (Fig. 32.1) y se aplica no sólo a las semillas sino a cualquier tipo de material. El principal factor determinante de EMC es RH, mientras que la temperatura tiene un efecto menor. Por ejemplo, los granos de cereales a 25ºC y 70% de humedad relativa muestran EMC entre el 13 y el 14% (sobre peso fresco). Usando la ecuación 32.1 esto corresponde a un potencial hídrico de -49095 kPa (-49.1 Mpa). Uno de los principales factores que afectan a la relación entre EMC y RH es el contenido de aceite: las semillas ricas en aceite mostrarán una EMC inferior para una determinada RH. Esto se ve claramente cuando se comparan las semillas de trigo y girasol (Fig. 32.1). Es importante señalar que la humedad de la semilla puede ser expresada sobre peso seco o peso fresco:

$$EMC_d = 100\,\frac{peso\ agua}{peso\ seco\ semilla} \tag{32.2}$$

$$EMC_w = 100\,\frac{peso\ agua}{peso\ fresco\ semilla} \tag{32.3}$$

Por lo que:

$$EMC_w = \frac{EMC_d}{100 + EMC_d} \tag{32.4}$$

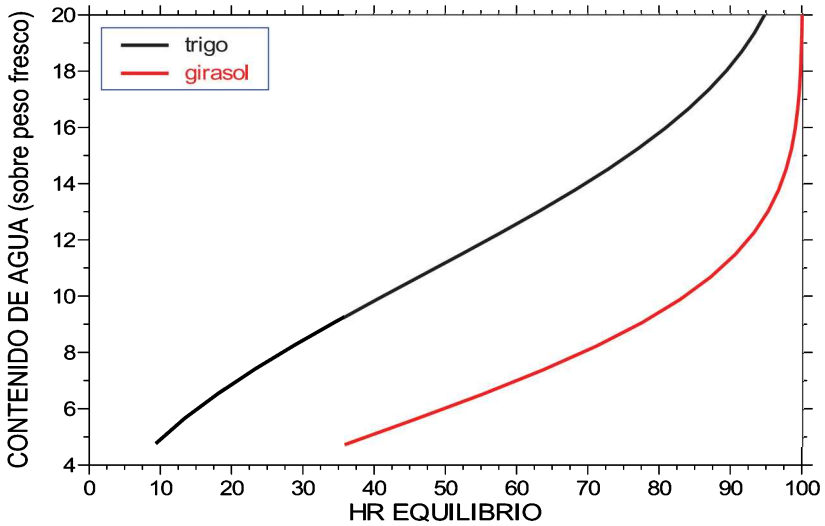


Figura 32.1. Isotermas de humedad para semillas de trigo y girasol a 20ºC.

Las semillas se clasifican como ortodoxas (se pueden secar hasta contenidos de agua muy bajos sin ser dañadas) como en la mayoría de las especies agrícolas y recalcitrantes (la desecación mata la semilla) como las de *Quercus spp.,* palma de aceite, castaño y cacao. La longevidad de la semilla en semillas ortodoxas disminuye linealmente con el potencial de agua desde -350 (2-6% de agua) hasta -14 MPa, que es equivalente a un rango de a_w de 0.1 a 0.9, independientemente de la especie. La longevidad de la semilla disminuye también con la temperatura. Se han propuesto reglas simples para el almacenamiento de semillas. Por ejemplo, la regla de James establece que la suma de la temperatura (ºC) y la humedad relativa (%) debe ser menor de 60. Por otra parte, la regla de Harrington establece que la longevidad de las semillas disminuye a la mitad por cada aumento del 1% en el contenido de humedad de la semilla o cada 6ºC de aumento de la temperatura.

Por seguridad la humedad relativa en el espacio entre los granos tiene que ser menor que 67-70%, lo que evita la germinación de las esporas de patógenos. Por lo tanto, manteniendo una baja humedad relativa nos aseguramos de que las semillas no pierden viabilidad ni peso (por la respiración) y no son atacadas por patógenos e insectos.

Los granos pueden requerir acondicionado (secado, limpieza) antes de ser almacenados de forma segura. Los sistemas de acondicionamiento se dividen en sistemas de aireación, secado al aire, sistemas de baja temperatura (calentamiento de 3-7ºC) y sistemas de alta temperatura. Las pérdidas de granos en post-recolección debidas a diferentes causas son importantes, particularmente en los países en desarrollo, donde gran parte de la producción se conserva en el ámbito doméstico. Aun-

que a menudo se dan cifras de hasta el 40% de pérdidas, el Banco Mundial estimó que en 2010, el valor de las pérdidas posteriores a la recolección ascendió al 15% de la producción de cereales en el África subsahariana.

La Tabla 32.4 presenta los valores de contenido de agua de semillas en madurez fisiológica y valores recomendados para la recolección y el almacenamiento.

Tabla 32.4. Contenido de agua de órganos cosechados en madurez fisiológica y en el momento adecuado para la recolección y valores recomendados para la recolección y el almacenamiento a largo plazo.

Cultivo	Madurez fisiológica	Adecuado para la recolección	Contenido de agua recomendado para la recolección		Almacenamiento a largo plazo
			sin secado al aire	secado al aire	
Cereales de invierno	35-40	<17-18	12		13.7-15.2
Maíz	25-30	18-23			12.5-15.5
Arroz	30-33	22-28			
Colza	40	<15	8		8
Girasol	30-40	9-10			7.0-8.3
Lenteja		<13			
Soja	50	14-20	14	18	12
Sorgo	25-30	12-25	14	20-25	12
Judía	38-44	30-40			
Mijo perla	30	<20			<13.5

32.6. RECOLECCIÓN DE CULTIVOS FORRAJEROS

En algunos pastos y cultivos forrajeros el aprovechamiento puede ser realizado directamente por los animales en pastoreo. En este caso es importante ajustar la densidad de animales para maximizar la productividad. Los animales también pueden pastar los cultivos durante determinadas etapas de desarrollo o después de la recolección para utilizar el rastrojo. El primero es el caso de los cultivos de doble aprovechamiento (cereales, colza) que pueden ser defoliados durante el crecimiento vegetativo, ya que los meristemos no se ven afectados, por lo que el crecimiento del cultivo puede reanudarse después y conducir a la producción de semillas si la duración del ciclo es suficiente.

En general, los cultivos forrajeros se almacenan en forma de ensilaje (50-65% de contenido de agua), henilaje (30-50%) o heno (15-25%). La mejor calidad nutritiva

en la mayoría de los cultivos forrajeros se consigue alrededor de la floración. El retraso de la siega después de ese momento implica una mayor biomasa (y más seca) pero de menor calidad. El otro factor que determina la fecha de siega es el clima, ya que las condiciones después del corte deben ser favorables para el secado.

Para el ensilado el cultivo se siega, se pica y se lleva al silo donde se compacta para excluir el aire y luego se sella con un plástico para garantizar unas condiciones anaeróbicas. Estas son necesarias para que las bacterias lácticas operen, reduciendo el pH y asegurando así la conservación a largo plazo. Algunos cultivos (maíz, sorgo) pueden llevarse al silo justo después del corte, mientras que otros se dejan secando en el campo durante 1-2 días antes del ensilado. Para el henilaje el cultivo se deja más tiempo en el campo para el secado y a continuación, se envuelve herméticamente en balas cubiertas de plástico.

La producción de heno requiere un período de secado más largo. Después de segar y, a veces, acondicionar (triturar para acelerar el secado), el material se mezcla, se voltea y se deja en hileras hasta su secado. Después de eso se compacta en balas o pacas. El tiempo de secado en hileras tiene que ser minimizado para reducir las pérdidas por respiración. Ese tiempo es proporcional a la biomasa de forraje e inversamente proporcional al área que ocupan las hileras y a la demanda evaporativa.

32.7. RECOLECCIÓN DE ÓRGANOS SUBTERRÁNEOS

En esta categoría se incluyen las especies que se cosechan por sus órganos de almacenamiento que se encuentran bajo tierra, tales como tubérculos (p.ej. patata, ñame), raíces (remolacha, nabo, yuca) y bulbos (cebolla, ajo).

La recolección de órganos subterráneos se debe realizar alrededor de la madurez fisiológica cuando queda poca área foliar verde, aunque hay variaciones dependiendo de factores de mercado; por ejemplo, en algunas zonas las patatas se cosechan antes de la madurez para conseguir mejores precios, a pesar de que se sacrifica parte del rendimiento. La eliminación o la muerte de la parte aérea antes de la recolección aumenta el engrosamiento de la peridermis de los tubérculos, lo que reduce el riesgo de descamación o heridas durante la recolección. Algunos cultivos de raíz como las zanahorias se cosechan cuando el tamaño es adecuado para el mercado.

El proceso de recolección de órganos subterráneos incluye el corte, el cavado y la carga. El producto puede ser transferido directamente a un remolque después de la separación de los residuos de suelos y plantas o dejarse en el campo para el secado.

A diferencia de las semillas, la desecación de los órganos subterráneos recolectados se debe evitar en condiciones de almacenamiento. Como la pérdida de agua es proporcional al VPD, la desecación se reducirá mediante la aplicación de aire húmedo y fresco (casi saturado).

32.8. RECOLECCIÓN DE FRUTAS Y HORTALIZAS

Las frutas para el mercado de productos frescos se recogen normalmente a mano en el momento en que alcanzan el tamaño deseado y se están acercando a la maduración. Las consideraciones de calidad son críticas en algunos cultivos como las uvas para vino. En este caso, la recolección se retrasa hasta que las uvas alcanzan un cierto contenido de azúcar, que se comprueba periódicamente, y/o se consiguen los colores deseados por los enólogos. En la producción de aceite de oliva, el aceite de cosecha temprana produce una mayor calidad tal como demandan los mercados (aceite más afrutado) a expensas de un menor contenido de aceite en el fruto y por tanto menor rendimiento de aceite. Una diferencia importante entre las especies es la producción de etileno para la maduración. Los frutos climatéricos (p.ej. pera, Apéndice 32.1) pueden madurar fuera de la planta una vez que han alcanzado la madurez fisiológica, por lo que pueden ser cosechados en cualquier momento después de alcanzar el tamaño comercial y madurado más tarde o pueden ser cosechados cuando están totalmente maduros. Los frutos no climatéricos (p.ej. naranja) tienen que estar en la planta para completar la maduración, por lo que la cosecha se debe retrasar hasta ese momento.

Las frutas para el procesado (enlatado, secado, conservas, extracción de aceite, zumos) pueden ser cosechadas mecánicamente (p.ej. con vibradores) cuando están maduras.

La recolección de frutos secos se produce después de la madurez fisiológica teniendo en cuenta dos factores: el contenido de agua y la formación de una zona de abscisión que promueve el desprendimiento del fruto en el momento de la cosecha. Si la recolección se retrasa mucho se produce una caída significativa de frutos, causando un aumento de los costes. Las cosechadoras de frutos secos se basan normalmente en la vibración del árbol y la recolección de los frutos en paraguas invertidos o tableros laterales desde los que se transfieren a un remolque.

BIBLIOGRAFÍA

ASABE Standards (2007) D245.6. Moisture relationships of plant-based agricultural products. ASABE, St. Joseph, Michigan, USA

Bakker-Arkema FW (ed) (1999) CIGR Handbook of Agricultural Engineering vol IV ASABE, St. Joseph, Michigan, USA

Lucia M, Assennato D (1994) Agricultural engineering in development: Post-harvest operations and management of food grains. FAO, Rome

Apéndice 32.1. Fracción de materia seca (MS), energía bruta por unidad de peso seco (EB) y composición principal de los productos cosechados

Los frutos frescos también se clasifican de acuerdo a la capacidad de maduración una vez separados de la planta en la madurez fisiológica (climatérico, C) o la falta de ella (no climatérico, NC).

Cereales y seudocereales		Parte cosechada	MS	EB	prot.	grasa	ceniza
			%	MJ/kg	% peso seco		
Cebada (2 carreras)	*Hordeum vulgare*	grano	86.5	18.4	14	3	3
Cebada (6 carreras)	*Hordeum vulgare*	grano	88.5	18.4	12	2.5	3
Maíz	*Zea mays*	grano	86	18.7	9.4	4.3	1.4
Mijo (cola de zorro)	*Setaria italica*	grano	90.5	18.8	11.9	4.9	3.6
Mijo (perla)	*Pennisetum glaucum*	grano	89.5	18.8	12.4	4.9	2.7
Mijo (africano)	*Panicum miliaceum*	grano	90.5	19	14.2	5.5	3.7
Avena	*Avena sativa*	grano	91	19.5	11	5.4	3
Arroz (pulido)	*Oryza sativa*	grano	87.5	18	10.4	0.5	0.6
Arroz (con cáscara)	*Oryza sativa*	grano	88	17.6	8.3	2.1	5.9
Centeno	*Secale cereale*	grano	87	18	10.3	1.4	2
Sorgo	*Sorghum bicolor*	grano	88	18.8	10.8	3.4	2.1
Triticale	*X Triticosecale rimpaui*	grano	89	18.1	11.7	1.5	2.1
Trigo Espelta	*Triticum spelta*	grano	89	19	12.2	3.9	2
Trigo blando	*Triticum aestivum*	grano	87.5	18.2	12.6	1.7	1.8
Trigo duro	*Triticum durum*	grano	87.5	18.5	16.5	2	2.1
Quinoa	*Chenopodium quinoa*	semilla	89	19.4	15.2	7.3	3
Alforfón	*Fagopyrum esculentum*	semilla	89.7	19	18.5	4.9	4.2
Leguminosas		**Parte cosechada**	**MS**	**EB**	**prot.**	**grasa**	**ceniza**
			%	**MJ/kg**	**% peso seco**		
Judía (seca)	*Phaseolus spp.*	semilla	89	18.6	24.8	1.7	4.6
Garbanzo (desi)	*Cicer arietinum*	semilla	89.5	19.6	22.1	5	3.3
Garbanzo (kabuli)	*Cicer arietinum*	semilla	89.5	19.6	22.3	6.4	3.5
Caupí	*Vigna unguiculata*	semilla	90	18.7	25.2	1.6	4.1
Haba	*Vicia faba*	semilla	90	18.7	29	1.4	3.9
Lenteja	*Lens culinaris*	semilla	89	18.5	26.9	1.6	3.8
Guisante (seco)	*Pisum sativum*	semilla	90	18.3	23.9	1.2	3.5
Cacahuete	*Arachis hypogaea*	vaina	93	27.5	27	39	2.6
Soja	*Glycine max*	semilla	87.5	23.6	39.6	21.3	5.8

Forrajes		**Parte cosechada**	**MS**	**EB**	**prot.**	**grasa**	**ceniza**
			%	**MJ/kg**	**% peso seco**		
Alfalfa (heno)	*Medicago sativa*	biomasa	25	18.2	18.2	2.1	10.7
Trébol (blanco,heno)	*Trifolium repens*	biomasa	25	17.4	22.7	2.2	12.3
Maíz (ensilado)	*Zea mays*	biomasa	30	18.9	8.1	2.6	4.8
Sorgo (ensilado)	*Sorghum bicolor*	biomasa	26	18.1	6.7	2.6	8.8
Azúcar, aceite y fibra		**Parte cosechada**	**MS**	**EB**	**prot.**	**grasa**	**ceniza**
			%	**MJ/kg**	**% peso seco**		
Algodón	*Gossypium hirsutum*	Fibra,semilla	91	23.8	21.8	19.7	4.4
Lino	*Linum ussitatisimum*	semilla	93.5	27	22	34	
Colza	*Brassica spp*	semilla	91	28.8	20.9	46	4.3
Cártamo	*Carthamus tinctorius*	semilla	92	26.1	15.6	32.2	2.4
Caña de azúcar	*Saccharum spp.*	caña	26	19	0.8	1.1	0.6
Girasol (aceite)	*Helianthus annuus*	semilla	91.5	28.7	20	44	4
Girasol (pipa)	*Helianthus annuus*	semilla	91.5	24	24	25	3
Tabaco Virginia	*Nicotiana tabacum*	hoja	8		35		19
Hortalizas		**Parte cosechada**	**MS**	**EB**	**prot.**	**grasa**	**ceniza**
			%	**MJ/kg**	**% peso seco**		
Alcachofa	*Cynara cardunculus*	flores	17	13.1	21.8	1	7.5
Espárrago (blanco)	*Asparagus officinalis*	tallos	7	12.5	32	1.8	8.5
Judía (verde)	*Phaseolus vulgaris*	vainas	8.7	11.7	24.1	4.6	8.0
Remolacha	*Beta vulgaris*	raíz	12	14.5	13	1.4	9
Brócoli	*Brassica oleracea*	Cabezas	11.8	12.4	36.4	5.1	5.1
Coles de Bruselas	*Brassica oleracea*	hoja	13	12.8	24	2.1	9.8
Col	*Brassica oleracea*	hoja	9.9	10.2	12.1	1.0	7.1
Zanahoria	*Daucus carota*	raíz	11	13.3	4.5	3.6	5.5
Coliflor	*Brassica oleracea*	cabeza	8.9	14.4	28.1	4.5	7.9
Apio	*Apium graveolens*	hoja	5	14.6	15	3.7	16.3
Chirivía	*Cichorium intybus*	hoja	8	12	21	3.8	16.3
Pepino	*Cucumis sativus*	fruto - NC	3.5	17.1	28.6	17.1	11.4
Berenjena	*Solanum melongena*	fruto - NC	7	13.5	12.7	2.3	8.6
Endivia	*Cichorium endivia*	hoja	6	11.5	20.2	3.2	22.7
Haba (verde)	*Vicia faba*	fruto	27	13.4	29	2.7	4.1
Apio	*Allium porrum*	bulbo	17	15	8.8	1.8	6.2
Lechuga Iceberg	*Lactuca sativa*	hoja	5	13.2	20.5	3.2	8.2
Lechuga Romana	*Lactuca sativa*	hoja	3.9	12.3	30.8	2.6	10.3
Melón	*Cucumis melo*	fruto - C	12	14.7	5.3	1.4	4

Melón Cantaloup	*Cucumis melo*	fruto - C	10	14.4	8.6	1.9	6.6
Perejil	*Petroselinum crispum*	hoja	10	12.6	24.8	6.6	18.3
Pimiento (verde)	*Capsicum annuum*	frutos	7.2	13.8	11.1	2.8	8.3
Pimiento (rojo)	*Capsicum annuum*	frutos	7.1	16.1	11.3	2.8	11.3
Calabaza	*Cucurbita spp.*	fruto - NC	9	13	11.9	1.2	9.5
Rábano	*Raphanus sativus*	raíz	6	13.2	13.6	2	11
Espinaca	*Spinacia oleracea*	hoja	6.5	10.6	40.0	9.2	30.8
Calabacín	*Cucurbita pepo*	fruto - NC	14	13.8	7.4	0.7	5.9
Fresa	*Fragaria x ananassa*	fruto - NC	9	15.1	7.4	3.3	4.4
Tomate	*Lycopersicon esculentum*	fruto - C	5.4	11.3	9.3	1.9	7.4
Sandía	*Citrullus lanatus*	fruto - NC	9	14.8	7.1	1.7	2.9
Frutales y vid		**Parte cosechada**	**MS**	**EB**	**prot.**	**grasa**	**ceniza**
			%	**MJ/kg**	**% peso seco**		
Almendro *	*Prunus amygdalus*	fruto	93	21.4	11.4	22.4	5
Manzano	*Malus sylvestris*	fruto - C	13.8	15.6	4.3	3.6	1.4
Albaricoque	*Prunus armeniaca*	fruto - C	14	14.8	10.3	2.9	5.5
Aguacate	*Persea americana*	fruto - C	27	25	7.5	55	5.9
Platanera	*Musa paradisiaca*	fruto - C	26	17.1	5.5	1.3	4.5
Chirimoya	*Annona cherimola*	fruto - C	21	15.2	7.6	3.3	3.2
Cerezo	*Prunus avium*	fruto - NC	19	14.9	6	1.1	2.7
Coco (copra)	*Cocos nucifera*	fruto	92	32.1	8.6	66	2.5
Palmera datilera	*Phoenix dactylifera*	fruto - NC	77	14.7	2.3	0.2	2.2
Higuera	*Ficus carica*	fruto - C	21	14.8	3.6	1.4	3.1
Vid (mesa)	*Vitis vinifera*	fruto - NC	17.3	15.2	4.0	1.2	2.9
Vid (vino)	*Vitis vinifera*	fruto - NC	18.9	15.1	3.2	0.5	2.6
Pomelo	*Citrus paradisi*	fruto - NC	11	14.7	6.9	1.1	3.4
Avellano *	*Corylus avellana*	fruto	91	24.5	13	33	1.9
Kiwi	*Actinidia spp*	fruto - C	17	13.3	6.7	3.1	3.6
Limón	*Citrus limon*	fruto - NC	13	11	10	2.7	2.7
Mango	*Mangifera indica*	fruto - C	18	15.2	5	2.3	3.2
Palmera de aceite	*Elaeis guineensis*	racimo	58	23.5	7.8	47	3.6
Olivo	*Olea europaea*	fruto - NC	50	24	4.2	53	11
Naranjo	*Citrus sinensis*	fruto - NC	18	14.6	7.2	1.7	3.4
Melocotonero	*Prunus persica*	fruto - C	12	14.6	8.1	2.2	3.8
Peral	*Pyrus communis*	fruto - C	14.8	12.3	2.0	0.7	1.4
Caqui	*Dyospiros kaki*	fruto - C	20	14.9	2.9	1	1.7
Piña	*Ananas comosus*	fruto - NC	14	14.9	3.9	0.9	1.6

Ciruelo	*Prunus domestica*	fruto - C	15	15.1	5.5	2.2	2.9
Granado	*Punica granatum*	fruto - NC	25	15.7	7.6	5.3	2.4
Membrillo	*Cydonia oblonga*	fruto - C	16	14.7	2.5	0.6	2.5
Nogal *	*Juglans regia*	fruto	93	24.7	12.3	32.1	2.4
Raíces, tubérculos y bulbos		**Parte cosechada**	**MS**	**EB**	**prot.**	**grasa**	**ceniza**
			%	**MJ/kg**	**% peso seco**		
Mandioca	*Manihot esculenta*	raíz	37.6	17.1	2.6	0.8	2.8
Ajo	*Allium sativum*	bulbo	39	15	15.4	1.2	3.6
Cebolla	*Allium cepa*	bulbo	10.9	13.8	9.2	0.9	3.7
Patata	*Solanum tuberosum*	tubérculo	23.5	16.9	10.8	0.5	7
Remolacha azucarera	*Beta vulgaris*	Raíz sin corona	20	16.9	7.8	0.5	6.9
Batata	*Ipomoea batatas*	tubérculo	30	17.4	5.5	1.1	3.6
Ñame blanco	*Dioscorea rotundata*	tubérculo	26.2	17.1	5.9	0.5	4.3
Ñame chino	*Dioscorea opposita*	tubérculo	18.6	17.3	8.7	0.5	4.2
Ñame amarillo	*Dioscorea cayenensis*	tubérculo	16.6	17.3	6.2	0.4	3.2

*incluyendo cáscara

Capítulo 33

Nuevas herramientas y métodos en la agronomía

P.J. ZARCO-TEJADA
L. MATEOS
E. FERERES
F.J. VILLALOBOS

RESUMEN:

Conforme van apareciendo nuevas tecnologías de la información y la comunicación, surgen nuevas oportunidades para perfeccionar el manejo agronómico. La agricultura de precisión, o el manejo del cultivo ajustado localmente, es un concepto de manejo basado en la observación y en la respuesta a la variabilidad dentro de la parcela. Este concepto se está aplicando cada vez más para el riego y el manejo de fertilizantes con la ayuda de sensores remotos que captan información de la vegetación en las bandas del espectro visible y térmico así como mediante sistemas de guiado automático basados en GPS. La teledetección se puede definir como la adquisición de información acerca de un objeto sin mediar contacto físico a partir del uso de sensores instalados en plataformas como satélites, aeronaves y/o soportes terrestres. Otras herramientas disponibles se basan en modelos de simulación de cultivos que integran las ecuaciones que representan la respuesta del cultivo a las prácticas de manejo (p.ej. densidad de siembra) y al ambiente (clima, suelo). Estos modelos se pueden combinar con datos de teledetección para el análisis y las predicciones a gran escala y para afinar el manejo del cultivo con ajuste local.

33.1. INTRODUCCIÓN

La agricultura comenzó hace unos diez mil años y, desde entonces, las mejoras de la tecnología agrícola han contribuido a aumentar la productividad. La agricultura intensiva en la segunda mitad del siglo XX fue capaz de lograr una alta productividad con altos insumos, aunque también generó impactos ambientales negativos.

El siguiente paso en la tecnología agrícola se basa en el uso de ordenadores y sensores próximos o remotos que permiten una aplicación más precisa y/o eficiente de los insumos en el campo. Esto se basa en el mejor conocimiento de la fisiología de los cultivos y en los avances de la agronomía durante el siglo XX. En este punto vemos que se pasó de una agricultura de bajos insumos/bajo control a una de altos insumos/bajo control durante las décadas de 1950 y 1960. La tendencia ahora es hacia una agricultura de insumos óptimos/alto control. En este capítulo se revisan algunas de las tecnologías que contribuyen a un mejor control en el manejo del cultivo.

33.2. LA TELEDETECCIÓN

33.2.1. Definición de teledetección

La teledetección se puede definir como la adquisición de información acerca de un objeto sin mediar contacto físico. A pesar de que, en general, se ha relacionado con la adquisición de imágenes desde satélite, el término teledetección es en realidad más amplio y se refiere de forma general a la recopilación de datos de objetos sin que exista un contacto físico. En otras palabras, la teledetección es a la vez la adquisición de datos a largas distancias (es decir, a 36000 km de la Tierra utilizando un satélite), así como la obtenida a tan sólo unos centímetros usando una cámara o un instrumento que colocamos cerca del objeto (es decir, una hoja, fruto o el suelo en nuestro caso).

33.2.2. Teledetección activa y pasiva

La teledetección de objetos utilizando diferentes tipos de sensores se lleva a cabo necesariamente a través de un ente físico que viaja desde los objetos a los sensores a través de un medio. Este ente en la teledetección es la radiación electromagnética, y el medio es la atmósfera. Una clasificación general de la teledetección puede hacerse en función de la naturaleza de la radiación que se utiliza para recopilar información de los objetos: i) la teledetección activa es aquella en que una señal es emitida y recibida por el sensor, y ii) la teledetección pasiva utiliza energía producida de forma natural (p.ej. la radiación solar reflejada).

33.2.3. El espectro electromagnético y las bandas espectrales

La radiación electromagnética es la energía propagada a través del espacio entre los campos eléctricos y magnéticos. El espectro electromagnético es la relación entre

energía y longitud de onda para las bandas que componen esa energía que van desde los rayos cósmicos, rayos gamma, rayos X a los rayos ultravioleta, visibles e infrarrojos incluyendo la energía de microondas (Figura 33.1).

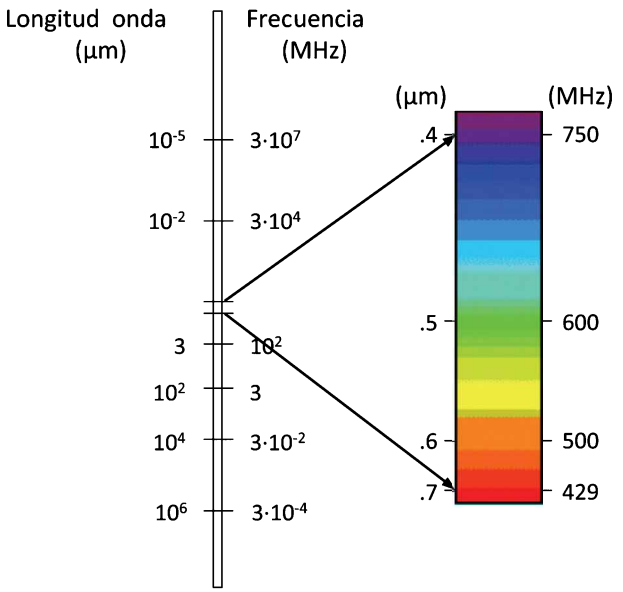


Figura 33.1. El espectro electromagnético clasificado en función de las longitudes de onda.

Nuestros ojos detectan la radiación en la llamada región espectral "visible", que oscila entre 400 y 700 nm de longitud de onda. Sin embargo, hay sensores que pueden detectar y medir la radiación por debajo y por encima del espectro visible, es decir, por debajo de 400 nm y por encima de 700 nm. La teledetección de objetos se realiza generalmente con sensores que trabajan en longitudes de onda en el ultravioleta (UV) por debajo de la región visible, así como en el infrarrojo, el infrarrojo térmico y las microondas reflejadas en la región espectral por encima de la parte visible del espectro. Es importante aclarar que por encima de la región visible algunos sensores detectan la radiación reflejada, mientras que otros detectan la radiación emitida. Por tanto, la región infrarroja reflejada se utiliza para recoger los datos de las longitudes de onda infrarroja reflejada por los objetos, mientras que la región del infrarrojo térmico se utiliza para recopilar la radiación emitida para obtener información acerca de la temperatura del objeto.

33.2.4. El concepto de multiespectral

La obtención de datos de reflexión o emisión por los sensores se lleva a cabo en las denominadas "bandas espectrales". Esto se debe a que cada detector es sensible a un rango y número de estas bandas espectrales específicas. La anchura en unidades

de longitud de onda y el número de estas bandas espectrales permite la adquisición de datos de objetos de forma multiespectral. Por lo tanto, la teledetección multiespectral se define como la medida de energía reflejada o emitida desde un objeto en múltiples bandas del espectro electromagnético (Figura 33.2). Cuanto mayor sea el número de bandas, y cuanto más estrechas sean, más información se puede obtener del objeto.

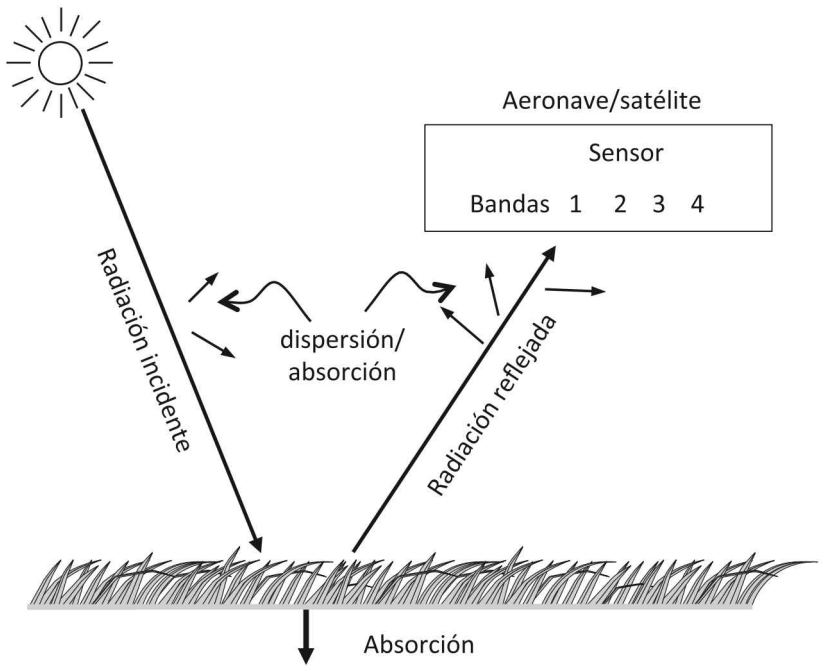


Figura 33.2. Teledetección multiespectral.

33.2.5. La reflectancia y las firmas espectrales

La energía medida por el sensor es una función de la radiación total incidente en un instante concreto. En otras palabras, la medición de la energía reflejada por el mismo objeto en dos momentos diferentes nos daría una cantidad diferente si la energía procedente del sol cambia. Por esta razón, los métodos de teledetección dependen de la normalización de dicha energía reflejada, dividiéndola por la radiación incidente en el instante de la medida. La reflectancia se define como la relación entre radiación reflejada por una superficie y la radiación incidente sobre dicha superficie. Los métodos de caracterización de las propiedades físicas de los objetos mediante teledetección se basan en el cálculo de la reflectancia para distintas longitudes de onda, desarrollando las denominadas firmas espectrales (Figura 33.3). En la figura 33.3 se puede observar la reflectancia de tres objetos diferentes: i) vegetación verde; ii) vegetación seca; y iii) suelo. La cantidad de energía reflejada por cada objeto cambia con la longitud de onda, lo cual es función de los constituyentes

bioquímicos que absorben y reflejan la energía de cada objeto en estudio. Al observar y analizar estas firmas espectrales es posible inferir el estado de la vegetación y los suelos mediante la estimación de la cantidad de pigmentos fotosintéticos que absorben luz (clorofila, carotenoides, xantofilas), la cantidad de capas de vegetación (índice de área foliar, densidad de la vegetación), y contenido de agua, entre otros.

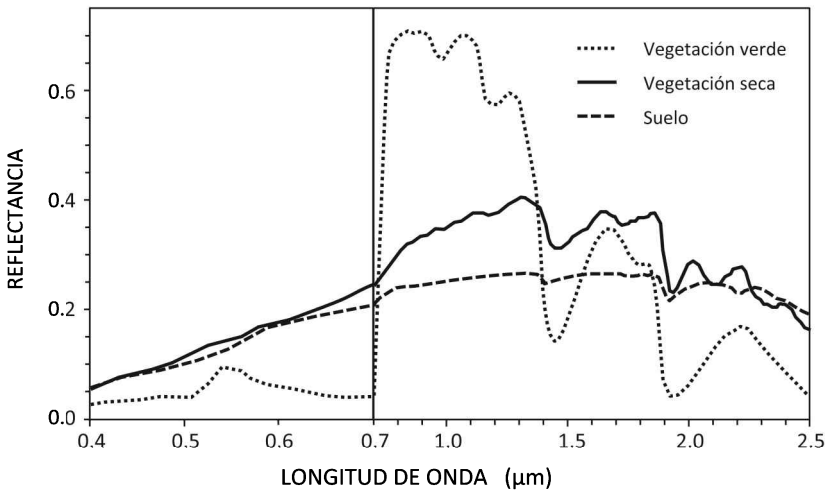


Figura 33.3. Firmas espectrales de vegetación verde, vegetación seca y suelo.

33.2.6. La resolución en teledetección

Hay cuatro definiciones que son importantes en teledetección para entender la calidad de los datos y las características de las imágenes: i) resolución espacial, ii) resolución espectral, iii) resolución radiométrica y iv) resolución temporal.

La resolución espacial es el tamaño de un píxel que se registra en una imagen que normalmente corresponde a una superficie cuadrada. El detalle discernible mínimo de una imagen depende de dicha resolución espacial del sensor y se refiere al tamaño del más pequeño cambio que puede ser detectado. La resolución espacial de los sensores pasivos depende principalmente de su campo de visión instantáneo (IFOV) del sistema compuesto por el detector y la lente. El área en tierra representada por un pixel se llama celda de resolución y determina la resolución espacial máxima de un sensor.

La resolución espectral es la anchura de longitud de onda y el número de bandas de frecuencia registradas por el detector, que determinan las firmas espectrales utilizadas para evaluar los objetos por los métodos de teledetección.

La resolución radiométrica se define como el número de intensidades o niveles de radiación que el sensor es capaz de distinguir. Típicamente, esto varía de 8 a 14 bits, lo que corresponde a 256 niveles de escala de grises y hasta 16384 intensidades en cada banda. También depende del ruido del instrumento.

La resolución temporal es la frecuencia de paso del satélite o de la aeronave por el mismo lugar de la superficie terrestre. La resolución temporal es relevante en los estudios de series temporales para entender cambios estacionales de la misma superficie terrestre.

33.3. LOS SENSORES Y LAS PLATAFORMAS DE TELEDETECCIÓN

Los sensores se clasifican generalmente como: i) ópticos; y ii) sensores de microondas.

Los sensores ópticos detectan la radiación visible e infrarroja en diferentes sub-regiones: i) infrarrojo cercano, ii) infrarrojo intermedio, y iii) infrarrojo térmico. Hay dos tipos de radiación que se puede medir con sensores ópticos: i) visible/infrarrojo cercano (reflejada) y ii) infrarrojo térmico (emitida).

En la región del visible/infrarrojo cercano los sensores detectan la radiación solar reflejada por los objetos, lo que se utiliza para cuantificar las condiciones de la superficie terrestre, como la distribución de plantas, bosques, campos cultivados, ríos, lagos, zonas urbanas, etc. Obviamente, esta técnica sólo se puede utilizar durante el día en condiciones de cielo despejado.

En la región del infrarrojo térmico la radiación detectada es la emitida por los propios objetos, que normalmente se utiliza para medir la temperatura de las superficies (véase el capítulo 3) y no se ve limitada al período diurno, pero sí es afectada por la nubosidad.

Los sensores de microondas pueden ser de tipo activo o pasivo y están diseñados para medir la radiación en la región espectral de las microondas, con longitudes de onda más largas que las de las regiones visible e infrarroja. La observación no se ve afectada por el periodo (día o noche) o las condiciones meteorológicas ya que las microondas atraviesan las nubes.

Las plataformas que se utilizan generalmente para la teledetección se pueden dividir en las siguientes clases:

a) plataformas de sensores cercanos que se utilizan para la adquisición de imágenes de alta resolución espacial desde torres, plataformas elevadoras, camiones y plataformas móviles en el campo.

b) plataformas aerotransportadas (es decir, aviones de diferentes tamaños y pesos) que se utilizan generalmente para la adquisición de imágenes en altitudes típicas entre 300 m y unos pocos kilómetros sobre el suelo. Pueden dividirse en vehículos aéreos tripulados y no tripulados.

    b.1) vehículos tripulados son las plataformas tradicionales para la fotografía aérea y las operaciones de teledetección utilizando cámaras pesadas que trabajan en las regiones del visible, el infrarrojo cercano y el infra-

rrojo térmico. El acceso a estos sensores está limitado, ya que tienen un alto coste de operación, por lo que se utilizan generalmente para fines de investigación, pero menos para aplicaciones operativas. Suelen ser rentables en casos en que la superficie a sobrevolar es muy grande. Los sensores que se pueden instalar en estas plataformas son generalmente muy caros, pero obtienen imágenes de muy alta calidad que ayudan a validar modelos y métodos de teledetección. Recientemente se han comenzado a utilizar nuevo sensores miniaturizados a bordo de aviones tripulados, lo cual permite disminuir el coste de operación desde estas plataformas tripuladas.

b.2) los vehículos aéreos no tripulados (UAV) también conocidos como aviones pilotados a distancia (RPAS) o "drones" son nuevos métodos disponibles desde hace pocos años, como resultado de la transferencia de esta tecnología desde las aplicaciones militares a las civiles. Estos drones son pequeños aviones que pueden volar de forma autónoma sobre las zonas deseadas a baja altura, y permiten por tanto la adquisición de imágenes de alta resolución utilizando sensores en miniatura. La envergadura y el peso de estas plataformas oscila entre menos de un metro hasta 5 metros, y entre menos de 2 kg hasta varios cientos de kilos. Los sensores utilizados pesan desde unos pocos gramos hasta varios kilos, y permiten recoger imágenes en las regiones del visible, infrarrojo cercano y térmico. A pesar de las limitaciones legales sobre el uso de aviones no tripulados para aplicaciones civiles, éstos ofrecen una gran flexibilidad en la adquisición de las imágenes a bajo coste, mayor resolución espacial y fácil operación por los usuarios finales.

c) Las plataformas de satélite típicamente siguen órbitas elípticas alrededor de la tierra. El tiempo que se tarda en completar un giro de la órbita se llama el periodo orbital. El satélite traza un recorrido sobre la superficie de la tierra a medida que avanza a través del cielo. Como la Tierra gira, el satélite traza un camino diferente sobre el terreno en cada ciclo subsiguiente. Los satélites de teledetección son lanzados a órbitas de tal manera que el satélite repite su trayectoria después de un intervalo de tiempo fijo. Este intervalo de tiempo se denomina ciclo de repetición del satélite.

Cuando un satélite sigue una órbita paralela al ecuador en la misma dirección que la rotación de la tierra y con el mismo período de 24 horas, el satélite aparecerá estacionario con respecto a la superficie de la tierra. En otras palabras, el satélite estará posicionado en todo momento en el mismo lugar sobre la Tierra. Esta órbita se llama geoestacionaria. Los satélites en las órbitas geoestacionarias están situados a una altitud de 36000 km. Las órbitas geoestacionarias son comúnmente utilizadas por los satélites meteorológicos, ya que pueden registrar grandes áreas de forma continua (es decir, la adquisición de una imagen cada 30 o 60 minutos para observar los fenómenos atmosféricos).

Una órbita casi polar es aquella con el plano de la órbita inclinada en un pequeño ángulo con respecto al eje de rotación de la tierra. Un satélite siguiendo una órbita casi polar pasa cerca de los polos y es capaz de cubrir casi toda la superficie de la tierra en un ciclo de repetición. Sin embargo, los satélites de observación de la tierra por lo general siguen órbitas sincronizadas con el sol, es decir, una órbita cuya altitud es tal que el satélite siempre pasará por encima de una ubicación en una latitud dada a la misma hora solar local. De esta manera, la misma condición de iluminación solar se puede lograr para las imágenes de un lugar determinado tomada por el satélite.

Dependiendo de la órbita (distancia a la Tierra) y del tipo de sensores soportados por la plataforma del satélite, los sistemas de imágenes de satélite se pueden clasificar en baja (> 1000 m de tamaño de pixel), media (100-1000 m), alta (5-100 m) y muy alta resolución (<5 m).

33.4. EL MANEJO DE RIEGO CON AJUSTE LOCAL

33.4.1. El manejo del cultivo con ajuste local

Aunque el adjetivo preciso referido al riego normalmente significa la aplicación de cantidades precisas de agua a los cultivos en momentos precisos -pero de manera uniforme en toda la parcela-, el riego de precisión, como parte del concepto de agricultura de precisión, difiere notablemente de este significado común. La agricultura de precisión, o el manejo del cultivo con ajuste local, es un concepto de manejo de la agricultura basado en la observación y la respuesta a la variabilidad dentro del campo. La agricultura de precisión se ha practicado en la aplicación con ajuste local de nutrientes o plaguicidas, para variar la densidad de siembra, para el control del tráfico de maquinaria en los campos, etc. El riego de precisión está en la categoría de agricultura de precisión, ya que consiste en la aplicación de agua a zonas predefinidas en una dosis y en un momento adecuados para optimizar la producción agrícola, maximizar la rentabilidad u otro objetivo de gestión en cada zona concreta del campo.

La agricultura de precisión incluye una serie de métodos, tecnologías y equipos. El riego con ajuste local (SSI, siglas del término en inglés site-specific irrigation) se ha desarrollado comercialmente para sistemas de riego autopropulsado de pivote central y de desplazamiento lineal, mientras que el riego localizado con ajuste local (por goteo o microaspersión) aún no ha salido del mundo académico. Los fabricantes de pivotes centrales y de desplazamiento lineal ya han producido equipos comerciales para regular la aplicación de agua en el tiempo y en el espacio (VRI, siglas del término en inglés variable rate irrigation). La máquina de riego está gobernada por un controlador equipado con un GPS y el operador puede introducir prescripciones de riego en el panel de control directamente o de forma remota. Las prescripciones se basan en los mapas de características del suelo y del cultivo. Por otra parte, un conjunto de sensores distribuidos en el campo pueden recopilar y transmitir datos para apoyar en tiempo real las decisiones de manejo.

33.4.2. Las oportunidades proporcionadas por el riego con ajuste local

El SSI-VRI adaptado a pivote central o máquinas de desplazamiento lineal permite detener el riego sobre caminos, balsas, cursos de agua, afloramientos rocosos, o cualquier otro elemento del paisaje que no requiera riego. Si varios cultivos se encuentran bajo el mismo sistema, el riego puede ser programado de acuerdo con las necesidades de cada cultivo.

Otra situación donde el SSI-VRI ofrece ventajas es cuando se produce escorrentía. Esto es más probable que suceda en pendientes pronunciadas, cuando la capacidad de infiltración del suelo es baja, y en el extremo distal de los pivotes centrales, donde la intensidad de aplicación es mayor. El SS-VRI permite aplicar el agua con menor intensidad en las zonas donde la infiltración es menor para minimizar la escorrentía. La máquina de riego debe entonces moverse a una velocidad más lenta para mantener la lámina de riego uniforme.

La relación entre el rendimiento y la evapotranspiración de la mayoría de los cultivos es una función lineal (Capítulo 14). Si el riego se maneja de forma que el campo no sufra escasez de agua, entonces el rendimiento será máximo y el riego con SSI no representa ninguna ventaja de rendimiento. Sin embargo, en algunos cultivos de crecimiento indeterminado y en árboles el máximo rendimiento puede conseguirse con un déficit moderado. Para esos cultivos, cualquier desviación de la evapotranspiración óptima se traducirá en una pérdida de rendimiento. Esta desviación puede ser causada por variaciones en el almacenamiento de agua en el suelo debido a la desuniformidad de la precipitación (lluvia, nieve o riego), a la variabilidad de la capacidad de retención de agua del suelo y al flujo lateral durante o después del episodio de precipitación.

En ambientes áridos, la contribución de la precipitación al almacenamiento de agua del suelo suele ser insignificante para los cultivos de regadío. Ahí, el riego uniforme diseñado para evitar el flujo superficial dará como resultado una acumulación uniforme de agua en el suelo, siempre y cuando el riego esté programado para la zona del campo donde el déficit de agua crítico (SWD_c, Capítulo 20) sea más bajo. Por lo tanto, en ambientes áridos y semiáridos, el SSI no ayuda en el ahorro de agua o a la mejora del rendimiento. La situación es diferente en ambientes sub-húmedos o mediterráneos, donde el aporte de las precipitaciones al consumo de agua de los cultivos de regadío puede ser significativo. Usando SS-VRI, la lámina de riego se puede ajustar para cada zona mediante la aplicación de menos agua donde el almacenamiento de agua es mayor. El cultivo irá usando agua de lluvia almacenada en el suelo, allí donde haya, con lo que se reducirá la dosis de riego necesaria.

Pueden existir diferencias de evapotranspiración en el campo debido a diferencias en la cobertura del cultivo. Una forma adecuada para estimar la evapotranspiración en los programas de riego con SSI consiste en calcular la distribución espacial de los coeficientes de cultivo sobre la base de la distribución de índices de vegetación multiespectrales. Estos están relacionados con la fracción de radiación interceptada, y el más utilizado es el NDVI (siglas del término en inglés Normalized Difference Vega-

tion Index). La evapotranspiración así derivada permite considerar la variación espacial de la cobertura del cultivo y representaría las necesidades de agua del cultivo no estresado. La idea sólo es válida antes de cobertura completa.

33.4.3. Definición de las zonas de manejo

La técnica más utilizada por los profesionales del riego de precisión con ajuste local para definir las zonas del campo es mediante una prospección por inducción electromagnética de la conductividad eléctrica aparente del suelo (EMI-ECa). En suelos no salinos, la EMI-ECa varía principalmente con la textura del suelo, el contenido de agua y la capacidad de intercambio catiónico. Por lo tanto, los mapas de EMI-ECa se utilizan en combinación con el muestreo de suelos para determinar de manera eficiente la variación espacial de las propiedades del suelo. Para delimitar las zonas de manejo, el mapeo de EMI-ECa se suele completar con mapas topográficos, de rendimiento, de suelos y de índices de vegetación multiespectrales. La temperatura de los cultivos y su relación con el déficit hídrico podría ser utilizada para determinar la variabilidad espacial del déficit de agua crítico. Si el cultivo no se riega durante algún tiempo después de lluvias abundantes o de un riego uniforme, la temperatura de la cubierta aumentará primero donde SWD_c es menor.

La monitorización continua del contenido de agua o el potencial hídrico del suelo permite la introducción de decisiones de manejo en tiempo real. La ubicación de los puntos de muestreo puede estar basada en los mapas EMI-ECa. Las sondas de neutrones proporcionan mediciones precisas del contenido de agua en el suelo, pero son caras y requieren personal especializado. Los sensores de capacitancia son inexactos para determinar el contenido de agua del suelo debido a los múltiples efectos ambientales que afectan a sus lecturas. Los sensores de reflectometría en el dominio temporal (TDR) son más precisos que los sensores de capacitancia y son cada vez más asequibles y más adaptables a las condiciones de campo. Los tensiómetros son difíciles de mantener en el campo. Sin embargo, los bloques de resistencia se pueden dejar instalados en el campo y conectados a registradores de datos y transmisores inalámbricos. Su problema es que pueden perder contacto con la matriz del suelo cuando éste se seca. El desarrollo de redes inalámbricas robustas facilita la instalación de sensores en el campo que no interfieren con las operaciones de cultivo.

Una alternativa a la medición de la humedad del suelo es la determinación del estado hídrico de la planta. La temperatura del cultivo se ha utilizado desde la década de 1980 para determinar el grado de estrés hídrico de los cultivos. Un conjunto de termómetros infrarrojos estacionarios instalados en lugares estratégicos que apuntan al cultivo, o montados en laterales móviles de aspersión para escanear el cultivo a través del campo, se pueden conectar a registradores de datos y transmisores inalámbricos para medir continuamente la temperatura del dosel. También se pueden obtener imágenes visibles e infrarrojas térmicas de alta resolución desde satélites o aeronaves que proporcionan instantáneas de la cobertura del cultivo y de la temperatura en todo el campo. Estas son vistas cenitales que, en condiciones de cobertura parcial, integran suelo y vegetación, lo que hace difícil discriminar el estrés de la plan-

ta de los efectos del suelo seco. Los sensores infrarrojos montados sobre el lateral de un pivote central cambian su orientación con respecto al sol y a las hileras de cultivo, lo que afecta a las lecturas de temperatura. Este es un problema menor si los sensores se montan en el lateral de una máquina de desplazamiento lineal.

Hay varias dificultades para la adopción de técnicas de teledetección en el SSI. Las imágenes de satélite son de bajo coste, pero su frecuencia y/o resolución espacial son insuficientes. Las imágenes aéreas pueden ser costosas para la frecuencia y superficie requeridas. La complicación del montaje de sensores sobre laterales en movimiento ha sido un impedimento para su aplicación comercial. La otra barrera para la adopción de este tipo de información es la dificultad que tienen los agricultores para entender y procesar esta información a tiempo.

33.5. POSICIONAMIENTO Y AUTOMATIZACIÓN

Los sistemas de posicionamiento de alta precisión como el GPS son tecnologías clave para la agricultura de precisión con ajuste local. Estos sistemas registran las coordenadas geográficas del campo y las zonas de manejo y localizan y gobiernan vehículos agrícolas con una precisión de unos pocos centímetros.

Hay diferentes niveles de conducción automática. Los sistemas de dirección asistida simplemente indican a los conductores el camino a seguir en el campo, por lo que el agricultor todavía tiene que accionar el volante. Los sistemas de dirección automatizados toman el control total del volante a lo largo de una línea, lo que permite que el conductor vigile la máquina en uso (pulverizador, sembradora). Los sistemas inteligentes de guiado permiten diferentes patrones de guiado adaptados a la forma del campo.

Los mapas de zonas de manejo, la conducción automática y la tecnología de aplicación variable se utilizan conjuntamente para ajustar las máquinas para aplicar, por ejemplo, una cantidad de semilla o fertilizante, según las variaciones espaciales en las necesidades del cultivo.

Los registradores de datos pueden ser también montados en máquinas en movimiento. El registro del rendimiento de grano se está volviendo muy popular. Se compone de dispositivos y sensores instalados en la cosechadora para calcular y registrar el rendimiento de grano en cada punto y la posición de la máquina mientras ésta se mueve. Los mapas de rendimiento pueden ser útiles para delimitar las zonas de manejo.

33.6. MODELOS DE SIMULACIÓN DE CULTIVOS, SISTEMAS EXPERTOS Y TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN

Un modelo de simulación de un cultivo es un modelo abstracto, matemático que captura el comportamiento del cultivo en respuesta al medio ambiente y al manejo durante todo el ciclo del cultivo. El modelo se convierte en un programa de ordena-

dor con las ecuaciones que representan la respuesta de las plantas a las prácticas agrícolas (p.ej. densidad de siembra) y al ambiente (variables meteorológicas, suelo). Por lo tanto el modelo se comporta de manera similar al cultivo real, por lo que pueden llevar a cabo experimentos virtuales que pueden ayudar en el manejo del cultivo o en la evaluación de genotipos. La ventaja obvia es que el modelo se puede aplicar a una amplia gama de climas o suelos ampliando el conocimiento limitado obtenido a partir de experimentos de campo. Sin embargo, los modelos son siempre representaciones simplificadas de la realidad de estos sistemas, por lo que debemos tener mucho cuidado en la selección del modelo adecuado y su verificación frente a datos experimentales.

Los modelos de simulación de cultivos se pueden clasificar según diferentes criterios:

a) Empíricos frente a mecanicistas: un modelo empírico relaciona el rendimiento con un conjunto de variables ambientales o de manejo. Por ejemplo, en las zonas áridas y semiáridas el rendimiento puede calcularse como una función lineal de la precipitación estacional. Por otra parte un modelo mecanicista se basa en los procesos biológicos, químicos y físicos relacionados con los mecanismos de crecimiento, desarrollo y formación del rendimiento del cultivo.

b) Caja negra frente a comprensivo: esta clasificación es paralela a la anterior. Un modelo de caja negra relaciona empíricamente las entradas y salidas de un sistema, sin ningún tipo de información acerca de cómo funciona el sistema. Un modelo comprensivo representa el sistema (p.ej. cultivo) mediante las ecuaciones que explican el funcionamiento del nivel de organización situado por debajo (p.ej. planta, órgano). Tomemos por ejemplo la producción de trigo en una explotación en relación con el manejo de nitrógeno. Podríamos escribir un modelo de caja negra en la entrada de la finca limitándonos a registrar la cantidad de fertilizante nitrogenado que entra en la explotación y la cantidad de trigo que sale de la misma. Nótese que en este caso no tenemos información de lo que está pasando, pero a largo plazo podemos ser capaces de predecir los rendimientos de trigo de la explotación en función del fertilizante de N adquirido. El modelo comprensivo requeriría entrar en la granja, recoger datos (suelo, clima, manejo) y el establecimiento de un modelo de crecimiento de trigo en relación con el suministro de N y otros factores. Está claro que un modelo de caja negra es barato y fácil de desarrollar, pero no es válido para otros sistemas.

c) Especificidad: algunos modelos de cultivos se han construido para una sola especie de cultivo (p.ej. OilcropSun para el girasol), mientras que otros son válidos para cualquier especie (p.ej. WOFOST). Los primeros son más detallados y utilizan parámetros para caracterizar los diferentes cultivares, mientras que los últimos utilizan diferentes parámetros para cada especie.

La mayoría de los modelos de cultivos existentes han sido construidos para especies anuales, mientras que sólo unos pocos se han desarrollado para árboles frutales (p.ej. OliveCan para olivo) debido a su menor importancia económica, mayor complejidad y escasez de un buen conjunto de datos para su calibración y validación.

Los modelos de simulación de cultivos no sólo son una alternativa a los experimentos de campo, sino que son la única opción para la evaluación de la producción de cultivos en condiciones no existentes. Por ejemplo las predicciones del impacto del cambio global en la agricultura se basan en modelos de simulación de cultivos. Algo similar ocurre con la evaluación de genotipos no existentes que se pueden probar utilizando un modelo con el fin de identificar los caracteres que deben ser incorporados en programas de mejora.

Aunque los modelos de cultivos primitivos se pueden remontar a la década de 1960 con el trabajo de de Wit en los Países Bajos y de Loomis en los EE.UU., el primer intento a gran escala en el desarrollo de modelos de cultivos para las principales especies (trigo, maíz) se produjo en los EE.UU. a finales de la década de 1970 y fue dirigida por Ritchie, Kiniry y Jones. El interés primordial de EE.UU. era estratégico, es decir, ser capaz de predecir los rendimientos de sus principales rivales en aquella época (URSS, China). Muy pronto se abandonó este esfuerzo y la modelización de cultivos se convirtió en una herramienta muy útil para la agronomía en todo el mundo.

Los modelos de cultivos se pueden integrar en un sistema de soporte de decisiones (DSS), un paquete de software que incluye también otras herramientas para la gestión de datos de entrada y el análisis de datos de salida, como DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer). Una herramienta aún más sofisticada consiste en un sistema experto, que es una aplicación informática con capacidad de aprendizaje y que pretende aproximarse a las decisiones tomadas por un experto humano. En general, un sistema experto incluye una base de datos y, a veces también un modelo de simulación de cultivos (p.ej. el modelo Gossym en el sistema experto COMAX para el algodón). Las tecnologías de la información disponibles (teléfonos móviles, sensores inalámbricos) facilitarán el desarrollo de aplicaciones muy específicas para el manejo de los cultivos mediante la incorporación de modelos de cultivos, DSS y sistemas expertos.

BIBLIOGRAFÍA

Campbell JB, Wynne RH (2013) Introduction to Remote Sensing, Fifth ed, Guilford Press, New York

Gebbers R, Adamchuk VI (2010) Precision agriculture and food security. Science, 327: 828-831

Jones JW, Hoogenboom G, Porter CH, Boote KJ, Batchelor WD, Hunt LA, Wilkens PW, Singh U, Gijsman AJ, Ritchie TJ (2003) The DSSAT cropping system model. Euro J Agron, 18:235-265

Jones HG, Robin A (2010) Remote Sensing of Vegetation: Principles, Techniques and Applications, Oxford U Press, Oxford

Oliver M, Bishop T, Marchant B (eds) (2013) Precision Agriculture for Sustainability and Environmental Protection. Routledge, Abingdon UK

Rees WG (2013) Physical Principles of Remote Sensing, 3rd ed, Cambridge University Press, Cambridge

Capítulo 34

Sistemas de cultivo y sistemas de producción

H. GÓMEZ MACPHERSON
F.J. VILLALOBOS
E. FERERES

RESUMEN:

Los sistemas de cultivo se pueden basar en un solo cultivo (monocultivo) o en muchos (policultivo), incluyendo cultivos asociados y rotaciones. Los cultivos asociados rara vez se utilizan en la agricultura occidental aunque ofrecen varias ventajas (mejor uso de los recursos, mejora de ciclo de nutrientes) que se cuantifican por el ratio equivalente de tierra (LER). Los sistemas agroforestales son un caso de cultivo asociado en el que los árboles proporcionan protección a los suelos, mejoran el balance de nutrientes de los cultivos y pueden proporcionar algunos productos útiles adicionales. Las rotaciones de cultivos suponen una diversificación en el tiempo y tienen muchas ventajas sobre el monocultivo (control de malezas, plagas y enfermedades, mejora de la nutrición, diversificación del riesgo). Los sistemas de producción tienen componentes de entradas y salidas interrelacionados a través de procesos que se manejan para lograr una producción agrícola económica con el fin de satisfacer las necesidades de la empresa y/o del hogar.

34.1. INTRODUCCIÓN

Durante el siglo XX la agricultura ha evolucionado en general desde una agricultura de bajos insumos hacia sistemas intensivos con altos insumos de energía, fertilizantes inorgánicos y plaguicidas. Durante las décadas de 1960 y 1970, la revolución verde exportó con éxito este tipo de agricultura a los países menos desarrollados, principalmente en los trópicos. A pesar de su éxito han surgido dudas sobre la sostenibilidad de estos sistemas agrícolas que buscan el máximo rendimiento, y se han propuesto sistemas alternativos (sistemas más sostenibles) en los que se persigue la estabilidad del rendimiento a largo plazo con un impacto mínimo sobre el medio. Un sistema sostenible debe tener algunas de las características de un ecosistema maduro (p.ej., diversidad), pero no hay que olvidar que las exportaciones de nutrientes del agroecosistema tienen que ser devueltas en forma de insumos (fertilizantes) para mantener la fertilidad del suelo a largo plazo.

34.2. TIPOS DE SISTEMAS DE CULTIVO

Un sistema de cultivo incluye los cultivos, su secuencia y las prácticas de manejo en un campo determinado. Un tipo de sistema de cultivo es el monocultivo continuo en el que el campo se cultiva con la misma especie cada año, lo cual es característico de grandes áreas de Norte y Sur América (p.ej. el cinturón de maíz de Estados Unidos) y, a veces se basan en altas entradas de energía y fertilizantes. En el otro extremo nos encontramos con sistemas de cultivo múltiple (cultivos asociados) que tienen en común la diversificación de los cultivos en el tiempo y/o espacio. El cultivo múltiple parece ser la forma más antigua de agricultura, y de hecho sigue siendo una práctica común en muchas áreas de los trópicos. En los países más desarrollados, los cultivos múltiples prácticamente desaparecieron y las rotaciones de cultivos, es decir, dos o más cultivos que crecen de forma secuencial en la misma parcela, son más comunes. En este caso, la diversificación sólo se realiza en el tiempo.

Los cultivos múltiples pueden variar en el número de cultivos por año y el grado de solapamiento entre los mismos. El cultivo doble o el cultivo triple significa sistemas con dos o tres cultivos completados secuencialmente en un solo año sin que sus ciclos se solapen. Por ejemplo, en la Llanura Indogangética los agricultores pueden conseguir dos cosechas de arroz en un año, la principal durante la temporada del monzón seguida de otra de regadío con un ciclo más corto, o una cosecha de arroz, seguida por trigo y luego por trébol de Alejandría en un solo año. En este caso, la meta de producción sería no tanto lograr altos rendimientos de un solo cultivo, sino maximizar los rendimientos por unidad de tiempo (de kg/ha a kg/ha/día). Por cultivos asociados entendemos dos o más cultivos que se producen con cierta superposición de sus ciclos de cultivo. Cultivos de relevo son aquellos en que se siembra un segundo cultivo sobre otro antes de que éste sea cosechado. Cuando se permite que un cultivo vuelva a crecer tras la recolección a partir de la coronas o del sistema radical, se utiliza el término cultivo de rebrote. Este es el caso de los cereales con capacidad de rebrote (p.ej. la cebada) o la caña de azúcar.

34.3. CULTIVOS ASOCIADOS

El cultivo asociado es el que combina simultáneamente dos o más especies en el mismo campo con el fin de utilizar los recursos de manera más eficiente y distribuir mejor las necesidades de mano de obra. El cultivo asociado fomenta la biodiversidad en la parcela y esto tiende a aumentar la estabilidad. En Europa, el cultivo asociado está presente en pastos (mezclas de trébol y gramíneas), en huertos familiares y en plantaciones frutales (cultivo entre hileras), pero rara vez se encuentra en los sistemas basados en cultivos anuales. El alcance limitado de los cultivos asociados se explica, en primer lugar, porque los niveles de fertilidad del suelo y la disponibilidad de fertilizantes inorgánicos son altos por lo que es difícil encontrar una ventaja productiva. En segundo lugar, el cultivo asociado apenas compensa las dificultades de manejo adicionales y el consiguiente aumento en los costos de producción. Sin embargo, se espera que la regulación de la producción ecológica en Europa aumente el interés por los cultivos asociados, incluyendo la producción de granos para alimentación animal. Este nuevo interés no debe significar necesariamente volver a los viejos sistemas, sino el desarrollo de nueva tecnología orientada a una agricultura ecológica innovadora.

En los países en desarrollo en los trópicos, el cultivo asociado es relativamente común, en general, mediante la combinación de una leguminosa con un cereal. Las leguminosas se incluyen en los suelos poco fértiles debido a su capacidad de fijación de N. En el Sahel, el sorgo y el mijo se siembra generalmente asociados con caupí. El grano de cereal se utiliza para la alimentación, la paja para el ganado y las hojas y la semilla de caupí se pueden utilizar tanto como alimento como para el ganado. En ambientes húmedos, el maíz se puede combinar con leguminosas de alto valor nutritivo como el cacahuete o poroto chino. Otras combinaciones son: cultivos de raíces profundas y de raíces poco profundas; cultivos altos y bajos, siendo éstos capaces de crecer en la sombra parcial de aquellos; entutorado de un cultivo bajo sobre otro más alto, por ejemplo, judía alrededor de maíz; el cultivo entre hileras; cultivos de crecimiento lento y rápido, de modo que el rápido se coseche antes de que el lento comience a madurar.

Los sistemas de cultivo asociado deben diseñarse cuidadosamente con el fin de limitar la competencia por luz, agua y nutrientes. También plantean desafíos para satisfacer el aumento de las necesidades de mano de obra o para mecanizar las operaciones, en particular la recolección. Antes de establecer los cultivos se deben considerar los siguientes elementos con el fin de minimizar la competencia y maximizar la complementariedad durante sus ciclos:

- Disposición espacial
  - Cultivo asociado al azar: las plantas de las diferentes especies se distribuyen al azar en el campo, por ejemplo, la asociación veza-avena para forraje.
  - Cultivos asociados en hileras: al menos un cultivo de la asociación se siembra en hileras. Incluye el cultivo entre hileras de árboles y los cultivos asociados en franjas (lo suficientemente anchas para facilitar el uso de las máquinas, pero lo suficientemente estrechas para que exista interacción entre especies).

  - Cultivos asociados de relevo: se establece un segundo cultivo sobre el primero antes de que éste sea cosechado.

- Densidad de siembra: debería reducirse en comparación con el monocultivo, pero la reducción debe ser menor en el cultivo más importante.
- Fecha de siembra/ciclo de los cultivos: diferentes ciclos o fechas de siembra darán lugar a diferentes picos de demanda de nutrientes, agua y luz reduciendo la competencia entre los cultivos. Un buen plan debe considerar el momento más oportuno para sembrar cada cultivo.
- La arquitectura de la planta: éste es un elemento clave al considerar la competencia por luz y la posibilidad de utilizar un cultivo como una estructura de soporte para otros cultivos.
- Manejo correcto, es decir, una fertilización adecuada en los momentos óptimos, localizada si los cultivos se disponen en hileras, un control efectivo de malas hierbas, plagas y enfermedades y una recolección eficiente con el mínimo daño a los cultivos posteriores.

Los beneficios potenciales de los cultivos asociados son los siguientes:

- Reducción del riesgo de plagas, y del impacto de fenómenos meteorológicos extremos y de fluctuaciones de precios. Además de reducir el riesgo gracias a la diversificación, por lo general la población de agentes naturales de control de plagas (depredadores, parásitos) se incrementa en el cultivo asociado.
- Uso más eficiente de los recursos (luz, agua y nutrientes) en el tiempo y el espacio debido a las diferentes necesidades de recursos de los componentes. Por ejemplo, una cubierta de arquitectura compleja puede mejorar la intercepción de la luz. El uso intensivo de los recursos por el cultivo asociado también reduce la disponibilidad de estos recursos para las malas hierbas.
- Mejora del ciclo de nutrientes en el sistema. La combinación de especies con diferentes patrones temporales de absorción de nutrientes reduce las pérdidas por lixiviación. Por otra parte, los cultivos con raíces profundas absorben los nutrientes de los horizontes más profundos. Algunos de estos nutrientes pueden volver a la superficie del suelo tras la mineralización de los residuos de dichos cultivos quedando disponibles para otros cultivos con sistemas de raíces poco profundas.

Las ventajas de los cultivos asociados con respecto a plagas y enfermedades no son claras en todos los casos. El número de parásitos y depredadores aumenta con el número de especies de plantas, pero también aumenta el número de especies de insectos y hongos potencialmente dañinos. El problema puede ser especialmente grave en el caso de los hongos del suelo. Cuando la planta huésped está siempre presente, se asegura la supervivencia de los patógenos.

El ratio equivalente de tierra (LER) se utiliza para determinar la eficiencia de los sistemas de cultivo asociado. Se calcula como sigue:

$$LER = \frac{Y_{I1}}{Y_{P1}} + \frac{Y_{I2}}{Y_{P2}} + \cdots + \frac{Y_{IK}}{Y_{PK}} = \sum_{1}^{K} \frac{Y_{Ii}}{Y_{Pi}} \quad (34.1)$$

donde K es el número de cultivos e Y_I e Y_P son los rendimientos como cultivo asociado y como cultivo puro, respectivamente, para el cultivo i. El cultivo asociado presenta ventaja si el LER es mayor que 1, lo que ocurre típicamente cuando los recursos del suelo (agua y/o nutrientes) son limitantes y las especies difieren en su patrón de crecimiento de las raíces o cuando una especie es una leguminosa. Hay una desventaja en el uso del cultivo asociado si el LER es inferior a 1.

La ventaja del cultivo asociado depende de la importancia relativa de los diferentes componentes. Por ejemplo, en la Tabla 34.1 se muestra el rendimiento y el LER de mezclas de veza (leguminosa) y avena (cereal) en la región de Castilla-La Mancha (España). En este caso LER sólo es mayor que 1 cuando la proporción de la avena es del 20% o inferior, debido a que la avena en pequeñas proporciones sirve para apoyar el crecimiento de la veza, ya que es una planta rastrera, por lo que ambas especies se benefician. Sin embargo, cuando la proporción de avena es alta, esta especie tiene una ventaja competitiva debido a su mayor altura en comparación con la veza.

Tabla 34.1. Rendimiento y LER de cultivos asociados de veza y avena en la región de Castilla-La Mancha (España). Adaptado de Caballero R, Garcia C (1996) Cultivo y utilización de la asociación veza-cereal en Castilla-La Mancha. CSIC, Madrid, Spain

Porcentaje de semilla veza:avena	Rendimiento materia seca (t/ha)			LER
	veza	avena	total	
100: 0	3.1	0	3.1	-
90: 10	3.2	1.0	4.2	1.19
80: 20	2. 9	1.8	4.2	1.13
70: 30	2. 2	1.8	4.0	0.97
60: 40	1.7	2. 6	4.2	0.95
0: 100	0	6. 6	6. 6	-

Ejemplo 34.1.

Los rendimientos de maíz y judía en secano en una zona tropical son 800 kg/ha y 600 kg/ha, respectivamente, en cultivo asociado, y 1200 y 800 kg/ha en cultivo puro.

$$\text{LER} = 800/1200 + 600/800 = 1.42$$

Ejemplo 34.2.

El cultivo asociado maíz-judía-calabaza en Centroamérica: las plantas de judía trepan por los tallos de maíz, mientras que las plantas de calabaza se establecen en medio, captando la luz que dejan pasar las otras especies. Cuando se compararon con cultivos puros en México, los rendimientos de maíz asociado fueron considerablemente más altos, mientras que los rendimientos de judía y calabaza sufrieron considerables reducciones. El maíz fue el cultivo más importante, y las judías y calabazas representaron una ventaja adicional. El LER para toda la mezcla fue considerablemente alto (1.6).

Ejemplo 34.1.

Maíz y soja asociados para ensilado en Canadá. Los cultivos asociados resultaron más rentables que los cultivos puros, aunque su éxito dependió de la densidad de siembra y de la disposición espacial. El mejor rendimiento se obtuvo usando el 67% de la dosis de siembra recomendada para ambas especies en cultivo puro. Este sistema dio lugar a un LER de 1.14. Alternando hileras de maíz y de soja se consiguió un mayor rendimiento (LER = 1.23), pero con costes más altos que contrarrestaron el incremento del rendimiento.

Ejemplo 34.1.

En EE.UU. se evaluó un sistema de franjas alternas maíz, soja y trigo de primavera cultivadas sobre lomos permanentes. El ancho de las franjas se adaptó a las anchuras de los equipos y se aplicaron herbicidas con un pulverizador. Las tiras fueron orientadas de este a oeste y siguieron un patrón trigo-maíz-soja, con soja en el lado norte del maíz. El trigo fue cosechado antes de que el maíz pudiera sombrearlo. Por otro lado, las franjas de maíz al lado de las franjas de soja se beneficiaron de la luz incidente adicional.

Ejemplo 34.1.

Huerto familiar. Cuando las semillas de rábano y zanahoria se siembran al mismo tiempo, los rábanos germinan y crecen rápidamente, y se cosechan cuando se acaban de establecer las zanahorias. Las plantas de lechuga toleran la sombra y, por lo tanto, son buenas para asociar con plantas más grandes. Se pueden plantar tomates jóvenes entre plantas de guisante al final del ciclo de éste para aprovechar el entutorado. El cultivo asociado de dos especies con diferente arquitectura y valor nutricional, como remolacha y ocra o pimiento y cebolla se practica en zonas tropicales de Asia.

34.4. LOS SISTEMAS AGROFORESTALES

La práctica de incluir árboles en los sistemas agrícolas es muy antigua y todavía es común en muchas partes del mundo. Recientemente los sistemas agroforestales están recibiendo una atención especial, sobre todo en las zonas tropicales, para aumentar la sostenibilidad. Los sistemas agroforestales son un caso especial de cultivos asociados.

En general, un sistema agroforestal es más estable que otros sistemas de cultivo. Los árboles protegen el suelo y el cultivo del efecto directo del viento y de la lluvia y mejoran el balance de nutrientes del sistema. Si se utilizan árboles (p.ej., *Acacia spp.)* o arbustos (p.ej. *Leucaena spp.)* de la familia de las leguminosas, también contribuirán al suministro de nitrógeno. Los árboles también pueden proporcionar alimentos (semillas) y leña.

La necesidad de conservar el suelo en muchos sistemas agrícolas en todo el mundo es probable que conduzca a un retorno a los sistemas de cultivo donde los árboles y las plantas anuales que actúan como cubiertas protectoras de la erosión, están asociados. En Europa, el proyecto SAFE (Silvoarable Agroforestry For Europe) ha descrito muchos sistemas de cultivo diferentes entre hileras de árboles o sistemas agroforestales. Los "dehesas" en España y los "montados" en Portugal son buenos ejemplos de sistema agroforestal en el que se incluyen árboles (Quercus), pastos naturales o introducidos, cultivos y ganado. Otros ejemplos son: cultivo de cereales en plantaciones de nogal, roble, olivo o higueras; hileras de vid asociadas con nogal o con olivo; cultivo de verduras bajo melocotoneros o bajo nogales de doble aprovechamiento (nuez y madera); maíz y soja entre las hileras de álamos; y remolacha forrajera bajo cerezos. Las cubiertas herbáceas protectoras del suelo también son muy comunes en las plantaciones, en particular en las zonas propensas a la erosión del suelo.

En Kenia cuando los árboles frutales son todavía jóvenes se asocian con todo tipo de cultivos herbáceos como judías, guisantes, patatas, maíz, mijo, verduras exóticas o indígenas, como una manera para lograr la seguridad alimentaria y asegurar ingresos mientras que los árboles no sean productivos. La platanera se puede asociar con batata y judía para reducir la incidencia de los picudos y los nematodos, y con *Grevillea robusta* para obtener madera.

34.5. LA ROTACIÓN DE CULTIVOS

La rotación de cultivos es una secuencia de cultivos en el tiempo, repetida cíclicamente o no. Las ventajas de una rotación de cultivos en comparación con el monocultivo son en parte similares a las de los cultivos asociados:

- Un mejor uso de los recursos (agua y nutrientes), o una mejora de la fertilidad si se incluyen leguminosas.
- Mejor control de malas hierbas, plagas y enfermedades.
- Diversificación de riesgos.
- Una mejor distribución de los medios de producción en la explotación.

La elección de la rotación de cultivos se basa principalmente en factores económicos. Esto ha llevado al monocultivo en muchas áreas agrícolas. Las especies y su orden en la rotación deben establecerse sobre la base de los siguientes criterios:

a) La duración de los ciclos y los requisitos ambientales de las especies: hay una gran variabilidad entre las especies y dentro de cada especie en la duración del ciclo de cultivo y en la capacidad de adaptación a las condiciones climáticas. Para las zonas templadas podemos hacer la siguiente clasificación en función de las fechas de siembra para las diferentes especies:

- Siembra de otoño-invierno:

  Cereales de invierno: trigo, cebada, centeno, avena, triticale.

  Leguminosas grano: haba, guisante, garbanzo, lenteja.

  Oleaginosas: colza, cártamo, lino

- Siembra de primavera:

  Cereales: maíz, sorgo, arroz.

  Oleaginosas: soja, girasol.

Algunas especies pueden pertenecer a diferentes categorías en función de las características climáticas de la zona. La remolacha azucarera se siembra en otoño en las zonas de inviernos suaves (p.ej. sur de España), y en primavera en las zonas más frías, como en la mayoría de los países europeos. Los cereales de invierno con bajos requerimientos de vernalización también se pueden sembrar a principios de primavera en zonas frías o al final del otoño en la región mediterránea.

Esta clasificación no debe tomarse estrictamente ya que la tendencia en los últimos años ha sido la de adelantar la fecha de siembra de los cultivos de primavera. Por ejemplo, cuando el girasol se introdujo en España en la década de 1960, se consideró como un cultivo de primavera y se sembraba en abril o mayo, mientras que hoy en día en muchas áreas se planta en febrero o marzo. Los cultivos de verano como el maíz se siembran en algunas zonas de climas templados (California, España) dos meses antes que hace treinta años. Esto también se debe a la mayor tolerancia del maíz a temperaturas subóptimas pues se cultiva cada vez más en los entornos fríos de las latitudes más altas. La adopción de técnicas culturales como el acolchado plástico puede también permitir un avance en la fecha de siembra de algunas especies (p.ej., algodón en el Valle del Guadalquivir en el sur de España).

b) El tiempo requerido para la preparación de la siembra de los cultivos siguientes: tras cosechar un cultivo se realizan una serie de operaciones (manejo de residuos, labores primarias, preparación del lecho de siembra) que pueden retrasar significativamente la siembra del cultivo siguiente en la rotación. Este tiempo puede reducirse si se hace siembra directa del siguiente cultivo (p.ej. trigo sembrado directamente después de la cosecha del arroz en el sur de Asia).

c) Características ecológicas (p.ej. profundidad de las raíces) y manejo de los diferentes cultivos. Tradicionalmente se ha recomendado alternar cultivos de entrelínea estrecha (cereales) y cultivos en hileras, lo que ayuda a controlar las

poblaciones de malas hierbas. Desde el punto de vista del control de plagas y enfermedades debemos evitar la repetición del mismo cultivo (o similar) en el mismo campo en años consecutivos. La rotación de cultivos es una buena herramienta para reducir la incidencia de plagas y enfermedades, en particular de los patógenos del suelo, ya que la ausencia de la planta huésped provoca una reducción en el inóculo que hay en el suelo. Algunas especies de cultivos y malas hierbas de la familia *Cruciferae* generan glucosinolatos que tienen efecto insecticida y fungicida, y por lo tanto proporcionan un efecto de limpieza del suelo. En Australia, la introducción de colza en rotación con trigo ha reducido la incidencia de pie negro en los cultivos de trigo en no laboreo.

d) El uso y la conservación de los recursos: el sistema de cultivo debe ayudar a prevenir la pérdida de agua y nutrientes del suelo. La situación actual de la agricultura europea puede promover la adopción de sistemas de cultivo más conservadores de los recursos naturales. Existen algunas prácticas de manejo del cultivo que pueden ser muy útiles en este sentido aunque a priori se consideren negativas. Por ejemplo, en zonas lluviosas en las que el nitrógeno es el factor limitante, mantener un barbecho limpio aumenta la lixiviación de nitratos pero, si las malas hierbas se dejan crecer en el campo, éstas capturarán N en forma orgánica y reducirán el contenido de agua en el suelo y por lo tanto, la percolación profunda y la lixiviación del nitrato. El mismo objetivo se puede lograr mediante el uso de cultivos trampa para capturar el N cuando el riesgo de lixiviación de nitrógeno es alto.

La inclusión de barbecho limpio (tierra no cultivada libre de malas hierbas) durante largos períodos sólo se justifica en áreas con muy baja precipitación, ya que dejando los suelos desnudos aumenta el potencial de erosión del suelo y las pérdidas de N por lixiviación. En principio, la rotación debe contribuir a mantener el suelo protegido por un cultivo o por residuos durante el período de lluvias o cuando los vientos son fuertes.

La inclusión de leguminosas en la rotación mejora el suministro de N. La contribución es más importante cuando la leguminosa se incorpora en el suelo como abono verde, lo que también ayuda a aumentar el contenido de materia orgánica.

Los efectos de algunos cultivos sobre otros en una rotación son a veces poco claros, ya que incluso la rotación de diferentes variedades de la misma especie (p.ej. maíz) puede tener un efecto positivo. Se cree que una parte importante de la interacción está relacionada con el mantenimiento de una gran biomasa microbiana en el suelo, capaz de una mineralización rápida.

34.6. EL DISEÑO DE LA ROTACIÓN DE CULTIVOS

La principal preocupación para la elección de los cultivos en rotación es el beneficio que supone para el agricultor, principalmente la reducción de costes y la optimización de los medios de producción. Además, el diseño de la rotación debe ser lo sufi-

cientemente flexible como para adaptarse a posibles cambios, y ser adecuado para las condiciones ambientales y de manejo (p.ej. conservación de suelos). Sin embargo, para aumentar la sostenibilidad de la agricultura, se deben considerar varios criterios adicionales:

a) Conservación de los recursos (agua, suelo, nutrientes)

- Reducir al mínimo la duración de los períodos sin cultivo;
- En los periodos sin cultivo dejar residuos para proteger la superficie del suelo;
- Incluir cultivos con raíces profundas para utilizar el N en capas profundas del suelo;
- Incluir leguminosas para mejorar el suministro de N;
- Mantener los niveles/aumentar el contenido de materia orgánica;
- Rotar especies con diferentes requerimientos de nutrientes.

b) Control de malas hierbas, plagas y enfermedades aéreas

- Alternar cultivos (cuánto más difieran, mejor) y evitar contigüidad de los mismos cultivos o similares. Cuando hablamos de diferentes cultivos no sólo queremos decir en términos botánicos, sino también en relación con el manejo, como por ejemplo, cultivos de invierno versus cultivos de primavera o cultivos con espaciamientos ancho versus estrecho.

d) Control de hongos del suelo

- Aumentar el tiempo entre la siembra del mismo cultivo o similar (del mismo tipo, de la misma familia) en la misma parcela
- Incluir cultivos de crucíferas que contienen glucosinolatos (que dan lugar a compuestos como los isotiocianatos que tienen efectos fungicidas, insecticidas y herbicidas).

34.7. SISTEMAS DE PRODUCCIÓN AGROPECUARIOS

Un sistema de producción se define como un conjunto de explotaciones que tienen similares bases de recursos, modelos empresariales, medios de vida familiares y limitaciones. Los sistemas agropecuarios se pueden clasificar en base a los siguientes criterios:

- Base de recursos naturales disponibles, incluyendo el agua, la tierra, las áreas de pastoreo y de bosque; el clima, del que la altitud es un determinante importante; la morfología del paisaje, incluyendo la pendiente; el tamaño de la explotación, la tenencia y la organización;

- Patrón dominante de las actividades agrícolas y del sustento del hogar, incluidos los cultivos, el ganado, los árboles, la acuicultura, la caza y la recolección, el procesamiento y actividades no agrícolas; y teniendo en cuenta las principales tecnologías utilizadas, que determinan la intensidad de la producción y la integración de los cultivos, el ganado y otras actividades.

En los sistemas agropecuarios de subsistencia, los agricultores producen alimentos para ellos y sus familias, y no tienen un beneficio económico, por ejemplo, la producción de arroz en Bangladesh o de sorgo-caupí en secano en el Sahel, mientras que, en la agricultura comercial, los agricultores venden sus cosechas y sus animales para obtener un beneficio, como en la mayoría de los sistemas agrícolas europeos. En general, los sistemas intensivos requieren grandes insumos de capital, de trabajo o de tecnología para lograr altos rendimientos por hectárea; las explotaciones suelen ser pequeñas, como por ejemplo en la horticultura de cultivos protegidos de Almería o en la producción de cerdos en Dinamarca. Los sistemas extensivos, sin embargo, se caracterizan por un bajo uso de insumos, grandes extensiones de tierra y bajos rendimientos por hectárea, como por ejemplo, en la producción de trigo-girasol en las zonas de secano de Andalucía, España. Los sistemas son arables cuando se dedican a la producción de cultivos, pastorales cuando se dedican a la cría de ganado y mixtos cuando combinan la producción vegetal y animal. La agricultura es sedentaria cuando la población está asentada de forma permanente y el terreno se explota cada año, mientras que los agricultores nómadas se mueven en busca de pastos frescos o nuevas parcelas para cultivar. Hay sistemas extensivos de subsistencia, como por ejemplo, el pastoreo nómada en África y en Asia Central, o sistemas de subsistencia intensivos, como por ejemplo, los sistemas de cultivo basados en el arroz en el Sahel. Entre los más complejos, existen sistemas de secano en zonas tropicales húmedas de alto potencial de recursos, que se caracterizan por una diversidad de cultivos (generalmente cereales, yuca, plátano, café, etc. a pequeña escala o en grandes plantaciones, y horticultura comercial), a menudo mezclados con producción ganadera.

El sistema de cultivo se puede considerar como una estrategia de gestión de recursos para conseguir una producción agrícola económica y sostenible con el fin de cumplir con algunos requisitos para la unidad familiar. Los sistemas agrícolas no son estáticos, ya que tienen componentes de entradas y salidas interrelacionados a través de procesos (Fig. 34.1). La gestión del sistema debe permitir al cultivo expresar su potencial, y para esto, se requiere una comprensión del sistema. En primer lugar, los insumos, los procesos y las salidas, y después, la influencia de los recursos naturales (el suelo, la pendiente, la lluvia, la temperatura, la luz, etc.) y los insumos humanos (mano de obra, maquinaria, energía, política, etc.) sobre los procesos y los productos. Se deben comprender sus efectos combinados en la escala de producción, formas de organización y los productos para así conseguir la optimización del sistema, también a medio y largo plazo.

La comprensión de cómo se toman las decisiones en las explotaciones es esencial para dirigir la investigación, promover la innovación y acelerar la adopción de innovaciones. ¿Cómo manipular los insumos naturales para utilizarlos de manera óptima y para evitar cualquier pérdida? ¿Se podría redirigir una mayor parte de los insumos

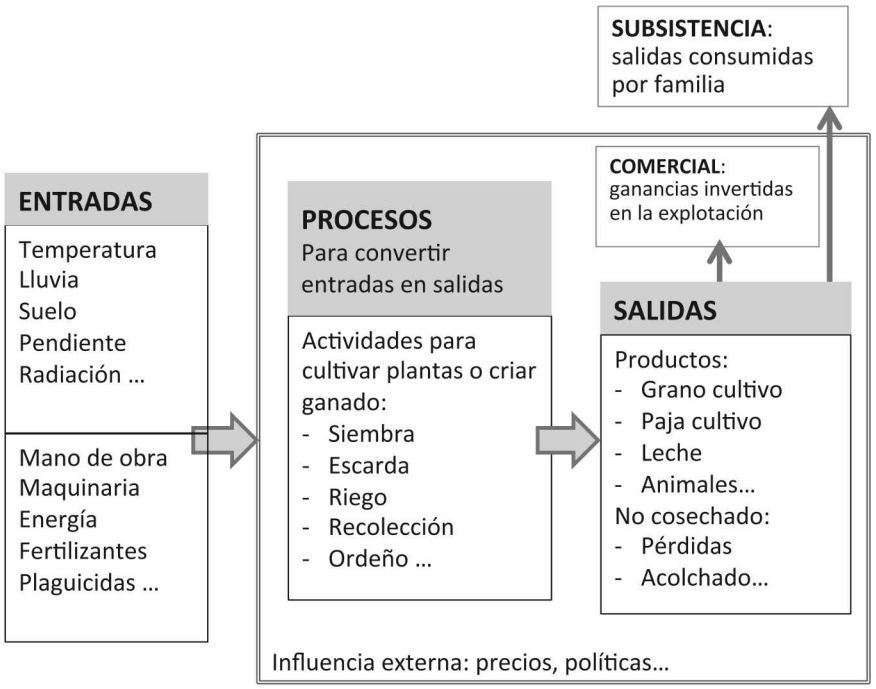


Figura 34.1. Insumos, procesos y salidas en un sistema de cultivo.

gastados a causa de enfermedades, malas hierbas y plagas, a la producción de grano? Si las enfermedades van aumentando, ¿se debe considerar un cambio de la rotación de cultivos para su control? ¿Se podría utilizar el rastrojo de los cultivos para aumentar la producción de los próximos cultivos? ¿Podrían utilizarse los recursos de agua de manera más eficiente para la producción de grano? ¿Es el sistema de gestión ambientalmente sostenible? ¿Los recursos suelo y agua se reducen gradualmente o son sobrexplotados? ¿Está aumentando progresivamente la salinidad del suelo por el manejo del riego? ¿Son los objetivos de rendimiento muy altos para las condiciones locales? Si reducimos el rendimiento objetivo ¿conseguiremos un uso más eficiente de los recursos?

BIBLIOGRAFÍA

Dixon J, Gulliver A, Gibbon D (2001) Farming systems and poverty: improving farmers' livelihoods in a changing world. FAO and World Bank, Rome, 412pp

Francis A (1986) Multiple cropping systems. Macmillan Publishing Company, New York, USA

Ouma G, Jeruto P (2010). Sustainable horticultural crop production through intercropping: The case of fruits and vegetable crops: A review. Agriculture and Biology Journal of North America, 1(5), 1098-1105.

Sullivan P (2003) Intercropping Principles and Production Practices. ATTRA publication, Agronomy Systems Guide. National Center for Appropriate Technology, USA.

http://el.doccentre.info/eldoc1/k33_/intercropping-principles.pdf

Vandermeer J (1989) The Ecology of Intercropping. Cambridge University Press, Cambridge, Great Britain.

Capítulo 35

La agronomía y la sostenibilidad de la producción agrícola

E. FERERES
F.J. VILLALOBOS

RESUMEN:

Las lecciones aprendidas desde el descubrimiento de la agricultura sugieren que la buena agronomía como una ciencia integradora es esencial para mejorar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas actuales. Para hacer frente a los desafíos de producir suficientes alimentos de alto valor nutritivo para una población creciente, los futuros agrónomos tendrán que combinar los avances en la mejora vegetal y la biotecnología con nuevos enfoques para mejorar la eficiencia del uso de nutrientes y agua en la producción agrícola. Existe un gran potencial en muchas áreas para aumentar los rendimientos para cerrar la brecha entre los rendimientos potenciales y reales, pero a medida que los rendimientos medios aumentan con el tiempo, ese potencial se reduce. Los peligros de la degradación del suelo y la escasez de agua requerirán la adopción generalizada de prácticas de conservación en base a grandes programas de extensión y al uso de las nuevas tecnologías informáticas. El cambio global tendrá resultados positivos y negativos en la agricultura de diferentes regiones, pero introducirá más incertidumbre en la definición de las mejores estrategias para hacer frente a la variabilidad del clima. El camino más probable hacia la intensificación sostenible de la producción transcurrirá por pequeñas mejoras continuas de la productividad en lugar de a través de descubrimientos revolucionarios, al menos a medio plazo.

35.1. INTRODUCCIÓN

La agricultura comenzó con la domesticación de los cereales hace unos diez mil años (10000 BP). Hoy en día las mismas especies (trigo, arroz, maíz) constituyen la base de la producción mundial de alimentos. Mucho antes de 10000 BP las semillas de algunas especies de gramíneas fueron recogidas y procesadas para aumentar la digestibilidad, como parte de una dieta variada que incluía frutas, animales y pescado. Las variaciones del clima (períodos más fríos y secos), probablemente condujeron a una reducción en la disponibilidad de alimentos naturales, por lo que era difícil recolectar plantas silvestres y cazar animales en cantidades suficientes. Eso explica por qué los seres humanos se vieron obligados a avanzar en la cadena trófica ya que los herbívoros tienen una mayor eficiencia de conversión que los carnívoros. Se encontró entonces que la productividad de las gramíneas silvestres aumentaba con algunas operaciones de manejo (p.ej., de escarda). Al hacerlo, estos proto-agricultores, de forma inconsciente, iniciaron la selección de plantas con características favorables (semillas más grandes, sin dehiscencia después de madurez ni latencia previa a la germinación), y después de la cosecha, algunas semillas se guardaban para la siembra posterior en otros campos. Este proceso de domesticación se produjo de forma independiente más o menos de forma simultánea en diferentes áreas del mundo, tales como el Lejano Oriente, Mesoamérica, y en el Próximo Oriente, donde se originaron el trigo y la cebada. El cultivo del arroz en China comenzó hace 11500 años, mientras que la calabaza fue domesticada en América Central hace unos 9000 años. Ese fue el comienzo, y muy rápidamente unas pocas especies de cereales y leguminosas lograron tener las características agrícolas deseadas. Al mismo tiempo, probablemente, los primeros agricultores observaron la ventaja de concentrar las plantas útiles en campos que podrían ser protegidos de los herbívoros o grupos humanos vecinos y limpiados de otras plantas competidoras. Esto también permitió una cosecha más eficiente.

La mayoría de los cazadores-recolectores tenían una dieta muy variada de plantas y animales silvestres, aunque en algunos casos subsistían casi por completo a base de carne o de unas pocas especies de plantas. A medida que se desarrollaba la agricultura, se seleccionaron algunas especies silvestres para diferentes propósitos, dando lugar a cultivos muy diferentes. Por ejemplo, *Brassica oleracea* ha sido seleccionado por sus hojas (repollo), tallos (colinabo), tallos florales (coliflor) y brotes (coles de Bruselas).

Con la agricultura se inició el desarrollo de la civilización moderna: los aumentos en la producción de alimentos condujeron al desarrollo tecnológico, ya que los excedentes de alimentos podían ser utilizados para alimentar a los artesanos e inventores a tiempo completo, lo que conduce también a la diversificación de las actividades humanas. También dio lugar a la estratificación social, la centralización política y la militarización por la posibilidad de alimentar a los aristócratas, burócratas y soldados a tiempo completo. Estas ventajas permitieron a las sociedades agrícolas desplazar al cabo de un tiempo a la mayoría de los cazadores-recolectores de todo el mundo hacia ambientes marginales.

La agricultura en su inicio fue de secano por lo que sólo podría prosperar en zonas con lluvias suficientes para sostener la producción de granos, que en el caso del trigo y la cebada supone un mínimo de 200-300 mm/año. En las zonas áridas, donde la precipitación fue errática e insuficiente para sostener la producción de cultivos, la agricultura de riego apareció por primera vez en 6000 BP en Egipto y Mesopotamia simplemente desviando agua de los ríos a los campos adyacentes durante los períodos de inundación. Esto pronto se transformó en sofisticados sistemas de distribución de agua que requerían una fuerte organización social para su operación y mantenimiento. Curiosamente, la falta de conocimiento acerca de la necesidad de controlar la salinidad mediante el exceso de agua de riego y el drenaje condujo al declive de algunas civilizaciones antiguas en las zonas áridas del Oriente Próximo basadas en la agricultura de riego.

El cultivo continuo del mismo campo pronto mostró bajos rendimientos debido a la pérdida de la fertilidad del suelo por la extracción de nutrientes y otras operaciones. Esto llevó a nuevos sistemas de cultivo tales como la agricultura de tala y quema, un modo primitivo de rotación destinado a la concentración de nutrientes después de muchos años de crecimiento de los bosques y luego liberarlos por la quema de la vegetación, lo que permite un par de años de cultivo con una producción suficiente. Esta forma de agricultura podría ser sostenible si el intervalo entre cultivos es lo suficientemente largo para reconstruir la fertilidad natural del suelo. Sin embargo, el crecimiento de la población aumentó la presión sobre el uso del suelo y la tala y quema se expandió en muchas áreas del mundo, y al final fue responsable de la deforestación y la degradación de muchas regiones, cuando la presión de la población llevó a una relación entre área de bosque y área de cultivos que era insostenible.

Las diferentes técnicas agrícolas evolucionaron en paralelo. El laboreo se inició con el arado romano que sólo corta un pequeño surco en el suelo y, por tanto, es útil para la siembra, pero no para el control de malas hierbas, la incorporación de residuos o para desbrozar terreno virgen. Los arados romanos aparecieron alrededor de 7000 BP en paralelo con la domesticación del ganado. De hecho, la forma más primitiva de siembra debe haber sido usando un palo para perforar un agujero en el suelo, colocando las semillas y cubriendo después con tierra, una práctica que ha sido utilizada por la mayoría de las sociedades indígenas. Los arados de vertedera aparecieron mucho más tarde y fueron diseñados para voltear la tierra para un control más efectivo de las malas hierbas. El arado, tirado por el hombre o por animales, se hizo popular en Europa alrededor del año 1500, lo que permitía una perturbación más completa y más profunda del suelo, y el volteo del suelo, que era la única manera de controlar invasiones agresivas de malas hierbas. Los europeos exportaron el arado a América, Asia y África, donde se facilitó en gran medida la expansión de la agricultura comercial con disponibilidad de mano de obra limitada. En algunas zonas, sobre todo en las zonas tropicales y subtropicales, el uso del arado de vertedera es insostenible debido al incremento de la erosión del suelo y a problemas de degradación de la tierra.

La ganadería también ha evolucionado en paralelo con la agricultura. Los animales domésticos no sólo proporcionaban alimentos y ropa, sino que además servían

como animales de tiro para la labranza, permitían la explotación como pastos de las tierras que eran inadecuados para la producción de cultivos, y contribuían al ciclo de nutrientes mediante la redistribución de nutrientes dentro de los sistemas agrícolas. Otros animales domesticados tuvieron un papel más específico, como los gatos como cazadores de roedores que se alimentan de cereales o los perros como guardianes en las zonas rurales. La producción de animales y sus productos por pastoreo extensivo es una práctica que tiene valores ecológicos, tales como contribuir a la conservación de la biodiversidad.

En los dos últimos siglos se dieron pasos de gigante en la ciencia y la tecnología agrícola con el desarrollo de maquinaria, la obtención de nuevas variedades, el uso de fertilizantes minerales y plaguicidas, a un ritmo acelerado desde la mitad del siglo XX. La modernización de la agricultura ha dado lugar a la separación de las diferentes actividades que antes eran todas parte de la vida de las explotaciones, y ha transformado la sociedad humana. Antes de la mecanización, la mano de obra de la mayoría de las actividades agrícolas representaba un esfuerzo físico que requería un gran número de trabajadores agrícolas que tenían una productividad muy baja. Además, la vida como trabajador agrícola no era muy agradable, lo que fue uno de los incentivos para la introducción de la mecanización de muchas operaciones agrícolas. A medida que la tecnología avanza, se requiere una mayor especialización para que los agricultores puedan concentrarse en un menor número de actividades para las que tienen que desarrollar las habilidades adecuadas y contar con la maquinaria y la infraestructura requeridas. Por lo tanto las sociedades rurales experimentaron una revolución que cambió la forma en que se hacía la agricultura y la condujo a la consolidación de las explotaciones, quedando menos agricultores, y generando vastos movimientos migratorios desde las zonas rurales a las ciudades en busca de una vida mejor. Antes de la mecanización, los agricultores explotaban cultivos, pastos y bosques y utilizaban animales para diferentes usos (alimentos, tiro, transporte). En ese momento, la vida de la mayoría de la población mundial se basaba en las actividades agrícolas, e incluso en 1950 más del 70% de la población mundial vivía en zonas rurales. Desde la década de 1950, el reto de alimentar a una población que crecía a una velocidad sin precedentes fue plenamente satisfecho por una agricultura en evolución en lo que ahora es considerado como uno de los mayores éxitos de la humanidad. En 1950 había alrededor de 2500 millones de personas en zonas rurales y alrededor de 750 millones en las ciudades. Para el año 2014, la población total había llegado a 7200 millones, con casi 4000 millones en zonas urbanas y, sin embargo, la agricultura produce ahora un 25% más de calorías por habitante que en 1950. Sigue habiendo, sin embargo, serias limitaciones en la distribución de alimentos y en el acceso a los mismos, principalmente en las zonas rurales, como lo demuestra la existencia persistente de la pobreza extrema y del hambre para cientos de millones de personas en el planeta. Por otra parte, existen dudas respecto a la sostenibilidad de los sistemas agrícolas actuales sobre si los recientes aumentos de productividad se han logrado a costa de la degradación de los recursos, con la consecuencia última de una disminución de la productividad en el futuro.

Aunque existe una gran diversidad entre los diferentes sistemas agrícolas actuales, la agricultura comercial se ha transformado ahora en un conjunto de industrias en

las que se producen cultivos o animales que pueden proporcionar insumos entre sí, pero de forma aislada. Esta nueva agricultura especializada ha tenido mucho éxito en el aumento de la productividad, pero su sostenibilidad a largo plazo sigue estando poco clara. En este capítulo vamos a discutir algunos aspectos importantes que representan amenazas futuras y retos para la agricultura y la producción de alimentos, tal como se llevan a cabo actualmente.

35.2. EL CLIMA, EL SUELO Y EL AGUA

La agricultura se lleva a cabo al aire libre y las plantas dependen principalmente del ambiente aéreo para el crecimiento y el desarrollo, y del suelo para el suministro de nutrientes y agua. El clima de un lugar determina qué especies pueden ser cultivadas y también el nivel de riesgo al que se enfrenta un agricultor si selecciona cultivos que pueden ser sensibles a las condiciones climáticas esperadas. A medida que el clima se vuelve más limitante, el riesgo de rendimientos muy bajos o incluso pérdida de cosecha aumenta (siendo el riesgo el producto de la probabilidad y del impacto) y la elección de cultivos se realiza como un compromiso entre las expectativas de beneficios y los riesgos. Mientras que la agricultura siempre ha estado presionando en los márgenes acercándose a los límites climáticos de la viabilidad de los cultivos, los agricultores tienden a huir del riesgo y siempre tratan de equilibrar la rentabilidad frente al riesgo. Un factor adicional que debe ser considerado es la variabilidad climática normal a la que la agricultura debe enfrentarse con cada campaña. Parte de la variabilidad puede explicarse por fenómenos regionales, tales como el calentamiento de las aguas oceánicas en el Pacífico, un evento denominado El Niño, que se produce con una periodicidad de varios años y causa un exceso de lluvias en algunas regiones y sequías en otras. En algunas zonas, como el este de Australia, se han desarrollado herramientas de predicción basadas en observaciones previas de los eventos El Niño, junto con las oscilaciones de presión barométrica (El Niño-Oscilación del Sur) para anticipar si la próxima temporada será más húmeda o más seca de lo normal. Esta información es crítica para diseñar estrategias para la campaña que conducen a la optimización de las fechas de siembra y de las inversiones en la aplicación de fertilizantes y otros insumos. Las predicciones estacionales están todavía en su infancia en muchas áreas del mundo, pero la mejora de su fiabilidad es esencial para reducir en gran medida los niveles de riesgo en la agricultura.

35.2.1. El cambio climático

Dentro de la variabilidad del clima que la agricultura ha experimentado desde su invención, ahora existe un consenso general de que el clima se está calentando conforme aumenta la concentración de CO_2 por las actividades humanas (quema de combustibles fósiles, deforestación). La temperatura media de la Tierra ha aumentado aproximadamente 0.8ºC desde 1880, mientras que la magnitud del calentamiento futuro es incierto en función del Modelo de Circulación Global (GCM)

utilizado y el escenario futuro de las emisiones de CO_2. Se puede esperar un aumento de temperatura de 1-4ºC con concentraciones de CO_2 entre 500 y 700 ppm para el final de este siglo. El posible impacto de este cambio global en la agricultura ha sido estudiado principalmente utilizando modelos de simulación (Capítulo 33) que predicen una disminución general de la productividad agrícola. Sin embargo la mayoría de los estudios no han considerado plenamente los efectos positivos de la elevada concentración de CO_2 en la fotosíntesis y asumen que los sistemas agrícolas no se adaptan al cambio. Sin embargo, el manejo del cultivo tendrá que adaptarse y mitigar, al menos parcialmente, los posibles efectos de los cambios ambientales. Por otra parte una mayor concentración de CO_2 conduce a la disminución de la conductancia estomática y al aumento de la fotosíntesis en plantas C3. Algunos de los principales efectos del calentamiento global sobre el comportamiento de los cultivos son los siguientes:

- Desarrollo del cultivo más rápido y acortamiento del ciclo de especies anuales. Esto reduciría el rendimiento, pero puede ser compensado por la siembra temprana y/o cambiando el cultivar (usando variedades de ciclo más largo o más sensibles a fotoperíodo).

- Aumento de la demanda evaporativa: muchos estudios han concluido que la ET se incrementará con el cambio global ya que la ET de referencia (Capítulo 10), que se calcula con sólo los datos meteorológicos, aumenta en paralelo a la temperatura del aire y al déficit de presión de vapor (VPD). Esto es engañoso, ya que el aumento en la concentración de CO_2 aumentará la resistencia de la cubierta, es decir, se reducirá la apertura estomática. Al final, el aumento del VPD debido al calentamiento puede ser compensado por el cierre de estomas, por lo que la ET probablemente apenas cambie.

- Mientras que el calentamiento global debería conducir a un aumento global de las precipitaciones, no es posible en este momento predecir futuros cambios en las precipitaciones a nivel regional con algún grado de certeza. Muchos de los modelos predicen un aumento en la frecuencia de eventos extremos, sequías e inundaciones, ya que el ciclo hidrológico se intensifica debido al cambio global. Sin embargo, estas predicciones no se han validado todavía y deben tomarse con precaución, aunque la agricultura sería mucho más vulnerable a un aumento en la frecuencia de eventos extremos que a un cambio gradual de la temperatura.

- Se pueden producir cambios en los factores bióticos (incidencia de insectos, enfermedades, malas hierbas), pero el resultado real es difícil de predecir. Algunas plagas podrían ser más dañinas que en la actualidad y otras lo serían menos, mientras que pueden surgir nuevas plagas o enfermedades en lugares donde no existen ahora. Por ejemplo los inviernos más suaves pueden favorecer la supervivencia de los insectos mientras que las primaveras más cálidas podrían promover el crecimiento de las malas hierbas C4 que compiten favorablemente con cultivos C3.

La agricultura ha contribuido en el pasado al cambio global principalmente a través del cambio de uso de la tierra ya que la superficie agrícola se ha expandido enorme-

mente desde la década de 1800 hasta 1960. Desde ese momento, la superficie dedicada a cultivos se ha mantenido más o menos constante y su contribución a las emisiones de gases de efecto invernadero ha sido modesta en relación con los de la industria y el transporte. Si bien hay prácticas agrícolas que contribuyen a la mitigación (p.ej. laboreo mínimo, Capítulo 18), la capacidad de la agricultura para mitigar el calentamiento global mediante el secuestro de carbono también es modesta en relación con las opciones derivadas de los cambios en los sectores de energía y transporte. Se debe hacer hincapié en la adaptación de la agricultura al cambio global mediante la combinación de mejora x agronomía x manejo que ha tenido tanto éxito hasta ahora, y al mismo tiempo, sacar provecho de las opciones de mitigación que también pueden contribuir a la sostenibilidad de la agricultura (véase más adelante).

35.2.2. La degradación de los suelos

A través de los siglos, la conversión de tierras para su uso en agricultura ha incluido zonas frágiles que son propensas a la degradación. La explotación de los suelos sin mantener su fertilidad mediante la restauración de la extracción de nutrientes y sus propiedades físicas (Capítulo 26) también conduce a la degradación del suelo. La exposición de la superficie del suelo desnudo a la lluvia y las operaciones de laboreo aumentan la tasa de pérdida de suelo natural o la erosión de las capas superficiales que normalmente son las más fértiles. Un episodio único de erosión del suelo puede representar una cantidad de pérdida de suelo que supera en varios órdenes de magnitud la velocidad de formación del suelo. A pesar de los avances en los métodos de observación de la Tierra, no hay buenas estadísticas del grado de degradación del suelo en todo el mundo, pero las estimaciones indican que el problema es muy relevante, lo que requiere un monitoreo periódico para evaluar su gravedad en las diferentes regiones. La erosión del suelo continuará siendo una importante amenaza para la sostenibilidad de los sistemas agrícolas de todo el mundo. La expansión de la agricultura de conservación (Capítulo 18) está ayudando en muchas áreas para controlar la erosión, pero requiere la adaptación de las técnicas agrícolas (maquinaria, cultivares, control de plagas) a las condiciones específicas del sitio y no se puede utilizar en todos los sistemas agrícolas. Hay suelos que requieren laboreo periódico para mantener algunas propiedades físicas y en algunas regiones los residuos de cultivos, necesarios para proteger la superficie del suelo como parte de la agricultura de conservación, no están disponibles porque se utilizan para la alimentación animal. La intensificación puede conducir a la producción de suficientes residuos de los cultivos para ambos usos. La salinización del suelo es otra amenaza para la sostenibilidad que afecta posiblemente hasta el 15-20% de la superficie de regadío del mundo. Una vez más los nuevos métodos de monitorización pueden reducir el riesgo y ayudar a introducir medidas de control para evitar el problema (Capítulo 22).

El mantenimiento de la fertilidad del suelo a largo plazo es esencial para asegurar la sostenibilidad de la agricultura. Esto es particularmente importante en relación con el fósforo, ya que las fuentes de fertilizantes de P son limitadas (Capítulo 26). Los esfuerzos deben centrarse en el reciclaje de P y en el aumento de la disponibilidad del P del suelo para las plantas. En el caso de N, la disponibilidad de fertili-

zantes nitrogenados dependerá de los precios de la energía por lo que la inclusión de leguminosas en la rotación de cultivos sería una solución parcial cuando sea necesaria. Sin embargo, el uso de fertilizantes nitrogenados sintéticos en la agricultura es extremadamente eficiente en términos de energía. Si la concentración de N en el grano es de alrededor de 2%, cada kilogramo adicional de N añadido a la cosecha va a apoyar un aumento en el rendimiento de 50 kg. La energía media necesaria para la producción del fertilizante de N es 77 MJ/kg (Capítulo 7) y ya que el contenido de energía del grano es de alrededor de 18 MJ/kg, la eficiencia marginal sería 900/77 = 11.7. Nuevos enfoques para mejorar la eficiencia del uso de fertilizantes de N permitirán reducir el N aplicado y por tanto se evitará la contaminación que afecta a los ecosistemas circundantes y a la calidad del agua en muchas áreas de producción intensiva.

35.2.3. La escasez de agua

La agricultura de riego se expandió mucho en la segunda mitad del siglo XX, pasando de 120 a cerca de 300 millones de hectáreas. De hecho, dado que la productividad de los sistemas de regadío es aproximadamente 2.75 veces mayor que la de los sistemas de secano como promedio en el mundo, hoy en día la producción de alimentos suficientes depende en gran medida de la agricultura de riego. La expansión del riego ha supuesto un alto coste desde el punto de vista ambiental. Por un lado, la construcción de embalses para el riego ha cambiado el entorno natural y tiene impacto en la ecología del río. Por otro lado, los flujos de retorno constituyen una fuente importante de contaminación difusa, que es inevitable en cierta medida si la agricultura de riego ha de ser sostenible. Esto es debido a que el mantenimiento del balance de sales a través del drenaje es esencial para evitar la salinización de las grandes zonas de regadío. Además, la expansión de la superficie de regadío y la intensificación de la producción requieren grandes cantidades de agua, hasta el punto de que el riego es el principal consumidor de agua desviada por el hombre para diversos usos. Más de dos tercios del agua desviada se consume en el riego en todo el mundo. Contrariamente a otros usos (p.ej. doméstico) donde el agua utilizada puede ser recuperada y reutilizada después de un tratamiento adecuado, la mayor parte del agua utilizada en el riego se evapora y por lo tanto sale de la cuenca. Si bien una fracción del agua de riego puede ser reutilizada, conforme el riego se hace más eficiente, tal fracción disminuye y el proceso de ET domina el uso del agua de riego. Junto con el aumento de la eficiencia, se debe prestar la debida atención al mantenimiento del equilibrio de sales en las zonas de baja precipitación y/o cuando se utilizan aguas salinas para el riego.

Un problema emergente que amenaza la sostenibilidad del riego en algunas zonas es el uso excesivo de agua subterránea más allá de su recarga a largo plazo. El uso de las aguas subterráneas puede exceder la recarga de acuíferos en los años de sequía, siempre que el exceso de extracción se reponga a largo plazo. Sin embargo, el aumento a largo plazo de la profundidad de los niveles de agua, que está ocurriendo ahora en algunas regiones de China e India, entre otros, es una indicación de uso no sostenible. En casos extremos, el hundimiento del terreno puede redu-

cir la capacidad del acuífero de forma permanente o causar la intrusión de agua de mar en las zonas costeras con el deterioro permanente de la calidad del agua. Una mejor evaluación de los recursos de agua subterránea en combinación con programas de recarga y la gestión prudente y estricta de los recursos puede aportar soluciones a este problema.

En la actualidad, el riego es sometido al escrutinio de los otros sectores de la sociedad que perciben que su participación en el consumo de agua es excesiva. Esto es particularmente crítico en zonas o periodos de escasez de agua, donde la competencia con otros usos se hace feroz y la demanda urbana y para otros usos tiene mayor prioridad. Así, mientras que hay una necesidad de ampliar el riego como una opción para la intensificación de la producción para satisfacer la demanda futura de alimentos, la competencia por los escasos recursos hídricos con otros sectores, como el medio natural, va a restringir dicha expansión forzando a la agricultura de riego a hacer más con menos agua. Aunque se dispone de muchas tecnologías avanzadas para la mejora del manejo del riego, su difusión generalizada se ha visto limitada hasta ahora. Ha llegado el momento para muchas zonas de riego de promover la adopción a gran escala de prácticas de riego eficientes con el fin de satisfacer tanto las necesidades cada vez mayores de productividad como los objetivos de la sociedad. Una certificación independiente del uso eficiente del agua en la producción de alimentos con indicadores apropiados será bien recibida por los consumidores y por el resto de la sociedad.

La promoción del uso eficiente del agua en la agricultura de secano es también un objetivo muy prometedor para la intensificación de la producción en el futuro. Los enfoques deberían centrarse en otros factores co-limitantes de la producción, como los nutrientes y en aceptar un mayor riesgo, abandonando los enfoques conservadores de la agricultura de secano que evitan el riesgo, pero no aprovechan las ventajas de los años buenos. La aceptación de más riesgo en la agricultura de secano requiere nuevas herramientas como las predicciones climáticas estacionales fiables, y servicios de asesoramiento que evalúen los riesgos de forma cuantitativa y ofrezcan opciones flexibles adaptadas a las condiciones locales. En su acepción más simple, el riesgo es el producto de la probabilidad y del impacto, y la prevención de los fenómenos extremos que podrían afectar irreversiblemente a la viabilidad de la agricultura causando hambre ha dominado en el pasado las estrategias de secano. En este sentido, la capacidad de resistencia del sistema agrícola, que es su capacidad para recuperarse después de una perturbación, es fundamental para la sostenibilidad del sistema. A medida que las nuevas tecnologías y nuevas políticas mejoren la capacidad de resistencia de los sistemas de secano, la adopción de un mayor riesgo dará lugar a aumentos de productividad en el futuro.

35.3. EL PAPEL DE LA MEJORA VEGETAL

El desarrollo de modernas tecnologías de mejora vegetal partir de 1950 ha producido nuevas variedades que son altamente productivas y de amplia adaptación. La característica principal que se ha mejorado en los cultivos más importantes es el

índice de cosecha, de forma que las variedades actuales tienen valores de HI que son un 50% mayores que las de hace cincuenta años. El éxito de la reciente intensificación de la agricultura a menudo se ha atribuido a las nuevas variedades sin reconocer que las variedades o insumos agronómicos no producen nada de manera aislada. Fue la combinación de nuevas variedades y nueva agronomía junto con un manejo adecuado lo que ha mejorado la productividad de los sistemas agrícolas hasta ahora.

Las técnicas de mejora de plantas son hoy en día más potentes y más eficientes gracias a la ingeniería genética, que ha dado lugar a la producción de nuevas variedades de cultivos etiquetados 'transgénicos' (Organismos Modificados Genéticamente, GMO). Los cultivos transgénicos han tenido mucho éxito hasta ahora para alterar las características de los cultivos que se regulan por unos pocos genes. Por ejemplo, la calidad de la semilla se puede mejorar (p.ej. arroz amarillo) o la planta puede adquirir propiedades insecticidas (p.ej. maíz BT o algodón BT) o el cultivo se hace resistente a un herbicida (p.ej. resistencia a glifosato en soja). Los objetivos principales eran reducir los costes de producción (mediante la aplicación de menos plaguicidas) y reducir/eliminar el uso de algunos plaguicidas, para contribuir a la mejora de la salud humana y evitar impactos sobre el medio. Las mejoras en la rentabilidad de las explotaciones han sido tales que la soja, el maíz y el algodón transgénicos han sido ampliamente adoptados en menos de 20 años, no sólo en los EE.UU., donde más del 90% de los tres cultivos son ahora transgénicos, sino también en algunos países en desarrollo, como la India o China. Los esfuerzos para producir transgénicos se están extendiendo a otros cultivos para hacer frente a estreses bióticos o a problemas de calidad de los cultivos.

Por el contrario, las promesas de mejorar las plantas frente al estrés abiótico (sequía/salinidad) usando GMO no se han cumplido hasta ahora. Esto se debe en primer lugar a la naturaleza compleja del problema. ¿Qué es la sequía? ¿El patrón de déficit de agua es el mismo todos los años? ¿Hay que buscar plantas "ahorradoras" de agua o "derrochadoras" de agua? Las primeras crecerán lentamente permitiendo así una mayor evaporación desde el suelo, pero en general tendrán más agua para completar el crecimiento de las semillas, asegurando así un alto HI. Por el contrario una planta "derrochadora" conduce a una mayor producción de biomasa y, probablemente, un mayor rendimiento en los años buenos, a expensas de un menor HI y menor rendimiento en años malos. Por lo tanto, la mejor variedad para secano depende de las condiciones locales (clima, suelo) y su variación de año en año. Por otra parte se debe considerar la estrecha relación entre la asimilación y la transpiración (Capítulo 14). La eficiencia del uso del agua (WUE) depende principalmente de la demanda evaporativa (VPD) por lo que poco se puede conseguir mediante la mejora para alta WUE bajo unas condiciones específicas. La selección de plantas con alta WUE podría resultar en cultivares similares al cactus que mantendrían sus estomas cerrados la mayor parte del tiempo! Los esfuerzos de mejora deben ser dirigidos a la manipulación del desarrollo para adaptar el ciclo a los patrones de sequía más probables y para ajustar la apertura de los estomas a los períodos de bajo VPD.

A pesar del éxito de los primeros cultivos transgénicos, existen preocupaciones sobre el uso de esta tecnología, en su mayoría relacionadas con la percepción de riesgos en la seguridad alimentaria y en el ambiente, así como la pérdida de la autonomía de los agricultores para la producción de semillas. El riesgo para los seres humanos es infundado e injusto ya que hay regulaciones estrictas en cuanto a la seguridad alimentaria y a la evaluación del impacto ambiental durante el proceso de mejora. Además, las variedades modificadas genéticamente están permitiendo una importante reducción en el uso de plaguicidas eliminando así un posible efecto tóxico. Las otras preocupaciones se ocupan de cuestiones sociales más amplias y de los derechos de propiedad intelectual y están más allá del alcance de este libro. ¿Es la tecnología agrícola, como los cultivos transgénicos que están en las manos de unas pocas empresas privadas, una verdadera amenaza para los pequeños agricultores de todo el mundo?

La mejora vegetal ha sido extremadamente eficaz no sólo para favorecer una mayor productividad, sino en la adaptación de los cultivos a nuevos entornos. Esto será aún más importante conforme con el calentamiento global ya los cultivos tendrán que ser adaptados a entornos más cálidos o a zonas frías de las latitudes más altas que hasta ahora no han sido adecuadas para la agricultura. Las principales especies cultivadas tienen muchos miles de variedades diferentes que ofrecen una amplia adaptación y que pueden ser probados y adaptados a entornos específicos a través de la mejora convencional y la moderna, combinadas con la nueva agronomía y manejo, y por lo tanto, al igual que en el pasado reciente, la adaptación de los cultivos será un objetivo muy importante para el futuro de la agricultura.

35.4. SISTEMAS AGRÍCOLAS ALTERNATIVOS: LA AGRICULTURA ECOLÓGICA

La intensificación de la producción agrícola de las últimas décadas con el uso extensivo de plaguicidas y los episodios de contaminación del entorno han favorecido la aparición de movimientos alternativos que cuestionan las prácticas agrícolas convencionales, viéndolas como insostenibles y poco saludables. Como resultado, se han propuesto otras formas de agricultura, algunas basadas en evitar el uso de productos químicos sintéticos y otras que combinan diferentes prácticas usando sobre todo el conocimiento tradicional. Estos movimientos alternativos han sido recibidos positivamente por algunas sociedades urbanas de todo el mundo que perciben la agricultura "industrial" como una amenaza para el bienestar humano y para el entorno natural.

El sistema de agricultura alternativa más popular es la agricultura ecológica basada en el uso exclusivo de abonos orgánicos como el estiércol y en métodos fitosanitarios que prohíben el uso de plaguicidas sintéticos y emplean el control biológico de plagas. La eliminación del uso de plaguicidas ha sido bien recibida por los consumidores y reduce el impacto ambiental de la agricultura, pero la agricultura ecológica también ha establecido un conjunto de reglas sin base científica, en particular las relacionados con la fertilidad del suelo, que se basan únicamente en la idea in-

genua de que lo natural es bueno y lo sintético es malo. Las moléculas tales como el nitrato, son exactamente las mismas independientemente de la procedencia del abono, por lo que producen los mismos beneficios al cultivo o pueden llevar al mismo problema ambiental (contaminación de las aguas subterráneas). Así, cuando sus sistemas se basan en seguir una serie de reglas estrictas, los agricultores orgánicos pueden ser condenados a bajos rendimientos/ingresos si los fertilizantes orgánicos son escasos y/o caros. A menudo, se necesita tierra adicional para fijar el N necesario en el suelo mediante el uso de cultivos para abonado verde. Si bien la agricultura orgánica ha tenido mucho éxito en la búsqueda de un nicho de mercado entre los residentes urbanos de las sociedades opulentas, la viabilidad de ampliar la agricultura ecológica más allá de una parte relativamente pequeña de la producción agrícola mundial es altamente cuestionable. La producción mundial de fertilizantes nitrogenados en 2010 fue de alrededor de 100 millones de toneladas N. Si eliminásemos por completo los fertilizantes sintéticos necesitaríamos leguminosas incorporadas al suelo como abono verde. Suponiendo una entrada promedio de 100 kg N/ha/año, necesitaríamos 10^9 ha, lo que es claramente imposible de lograr ya que la tierra cultivable total es sólo 1.5 10^9 ha. En otras palabras, la fertilización mediante abonado verde reduciría la tierra cultivable productiva a un tercio del valor actual.

35.5. LA AGRICULTURA COMO FUENTE DE ENERGÍA

La producción primaria es una fuente inagotable de energía y, por tanto, ha sido utilizada por el hombre desde hace mucho tiempo. Fue durante la crisis energética de la década de 1970 cuando la agricultura se consideró por primera vez como una fuente potencial de energía, bien mediante nuevos cultivos energéticos o mediante el uso de algunos de los principales cultivos para la conversión de biomasa y grano en combustibles. Desde ese momento, la mayoría de los cultivos energéticos no han cumplido sus expectativas iniciales (aunque las especies C4 recientemente probadas como *Miscanthus* podrían ser una opción viable) y la atención se ha desplazado a la producción de etanol a partir de caña de azúcar y maíz, y en menor medida a la conversión de aceites comestibles en biodiesel. La contribución de los combustibles fósiles al calentamiento global y los altos precios del petróleo en el pasado reciente han fomentado políticas para promover el uso de biocombustibles producidos en tierras agrícolas, particularmente en el América del Sur (caña de azúcar) y del Norte (maíz). A nivel mundial, mientras que el uso de biocombustibles reduce las emisiones de gases de efecto invernadero, la competencia entre la producción de alimentos y la energía es objeto de debate en términos éticos y ambientales. Por ejemplo, los incentivos para la producción de biocombustibles han contribuido a la expansión de la producción de aceite de palma a costa de los cultivos alimentarios o del mantenimiento de los bosques tropicales y por lo tanto han provocado un aumento de la deforestación. Este debate ha dado lugar a propuestas para utilizar sólo los residuos de cultivos como fuente de energía. Esta promesa de biocombustibles de "segunda generación" basadas en el uso de los residuos mediante la conversión de la celulosa en azúcares, que luego se convierten en al-

cohol se ha conseguido técnicamente, si bien los costes de producción siguen siendo altos en relación con los de biocombustibles a partir de la caña de azúcar o el maíz. La afirmación de que mediante el uso exclusivo de residuos de los cultivos no hay competencia con la producción de alimentos no es válida por dos razones: en primer lugar, los residuos de cultivos tienen un papel importante en la conservación y en el mantenimiento de la materia orgánica del suelo (Capítulo 18), y como alimento para el ganado en muchos sistemas agrícolas y en segundo lugar, si se pueden producir azúcares, entonces podrían también ser utilizados para la producción de alimentos.

La capacidad relativa de la agricultura como productor potencial de energía puede ser cuantificada mediante la comparación de la energía contenida en los productos agrícolas, con la energía quemada con combustibles fósiles. El consumo mundial total en 2010 de combustibles líquidos fósiles (gasolina, gasóleos, etc.) que se utilizan sobre todo en el transporte fue de alrededor de 70 millones de barriles/día, lo que equivale a 135 10^{12} MJ /año. Para el mismo año, la producción agrícola mundial fue de 3866 millones de toneladas de materia seca (Tabla 35.1) que corresponde a una energía total de 71 10^{12} MJ que es menos del 50% de la energía de combustibles líquidos. La UE ha establecido el objetivo de suministrar el 10% del combustible como biocombustibles para el año 2020. Si se aplica esta regla a nivel mundial se requerirían 13.5 10^{12} MJ lo que equivale a casi el 20% de la producción agrícola.

Tabla 35.1. Producción agrícola mundial en 2012 según el tipo de cultivo y la energía equivalente capturada.

	Producción	**Contenido energético**	**Energía equivalente**
Tipo	Mt materia seca	MJ/kg	EJ
Granos	2276	17	38.70
Aceite	450	27	12.15
Leguminosas	317	19	6.03
Azúcar	307	17	5.22
Almidón	230	17	3.91
Frutas	157	17	2.67
Verduras	74	17	1.27
No alimentario	38	17	0.65
Otros	15	17	0.26
Total	3866		70.85

35.6. EL PAPEL DE LAS TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN/ COMUNICACIÓN, LA INVESTIGACIÓN Y LA EXTENSIÓN

Los beneficios de las inversiones en la investigación agrícola han sido tan altos que algunos han calificado la investigación agrícola como el mejor negocio del sector público de la historia. La investigación agrícola moderna comenzó en las últimas décadas del siglo XIX, sobre todo en Alemania, EE.UU. e Inglaterra. Después de la Segunda Guerra Mundial, en vista de la necesidad de producir más alimentos para una población en crecimiento, hubo una iniciativa liderada por fundaciones privadas y algunos países para desarrollar un sistema de investigación agrícola internacional que con el tiempo se convirtió en el Grupo Consultivo de Investigación Agrícola Internacional (CGIAR) con centros de investigación ubicados en países en desarrollo. El CGIAR desarrolló los primeros cultivares enanos de trigo y arroz que eran más productivos que los cultivares altos existentes, dirigiendo lo que más tarde se llamó "revolución verde". Todos los países han establecido sus sistemas de investigación agrícola que han contribuido a los aumentos sostenidos en la producción de alimentos en todo el mundo desde 1950.

Junto con la investigación agrícola, algunos países como los EE.UU. desarrollaron un sistema paralelo para la difusión de los nuevos resultados entre los agricultores para promover la adopción de las nuevas técnicas desarrolladas por los investigadores. La extensión agrícola también ha tenido mucho éxito y hay muchos ejemplos de adopción exitosa de nuevas técnicas que se experimentaron a nivel local y fueron probadas por el servicio de extensión. Muchas de las técnicas desarrolladas recientemente requieren una adaptación a las condiciones locales, como requisito previo para su adopción por los agricultores. Sin un buen sistema de extensión, los agricultores dudan en adoptar nuevas ideas que no han sido probadas y adaptadas localmente, por lo que el progreso es lento. Además, al ser la extensión parte del sector público, es independiente de las empresas privadas y no muestra preferencias por determinadas variedades o productos. La extensión agrícola comenzó en los EE.UU. antes de finales del siglo XIX y ha sido en gran parte responsable de la expansión y el aumento de la productividad de la agricultura de Estados Unidos. Otros países han creado sistemas de extensión eficaces, pero muchos países en desarrollo no han invertido lo suficiente en extensión agrícola, lo cual limita la velocidad de adopción de soluciones eficaces que aumentan la productividad y la sostenibilidad. Una limitación es el gran número de pequeños agricultores que existen en muchos países que requerirán una gran fuerza de extensión para llevar a cabo el trabajo en el campo, si la extensión se realiza como lo ha sido hasta ahora (cara a cara). Sin embargo, las nuevas tecnologías de la comunicación tales como los teléfonos móviles tan extendidos en la mayoría de las áreas, podrían servir como formas innovadoras para llegar a las grandes poblaciones de pequeños agricultores con eficacia.

En general, las tecnologías de la comunicación han acelerado el acceso a grandes cantidades de información, pero no puede garantizar su calidad. La información facilitada por las empresas privadas es a menudo sesgada hacia los beneficios de sus productos y, a veces se escapa a las normativas sobre publicidad falsa. Es común ver páginas web en las que las empresas mencionan "estudios realizados en dife-

rentes universidades" (sin más detalles) para apoyar a sus productos. Se requerirán sistemas de investigación/extensión públicos para hacer frente a las necesidades de los agricultores y de toda la sociedad, en particular, proporcionando evaluaciones respecto a los efectos a gran escala o a largo plazo sobre los sistemas agrícolas (p.ej., erosión del suelo).

Ante las predicciones de aumento de la población mundial y de desarrollo económico, se estima habrá que producir un 70% más de alimentos producido en 2050 (véase más adelante). La magnitud de este reto no puede ser subestimada dadas las actuales tendencias de la productividad de los principales cultivos. La investigación agrícola desempeñará un papel importante en el cumplimiento de este desafío como lo ha hecho en el pasado, a condición de que los gobiernos de todo el mundo se den cuenta de las dificultades previsibles e inviertan los recursos suficientes para hacer frente a los temas de investigación relacionados con el aumento de la producción de manera sostenible. Los esfuerzos de extensión asociados, que serán muy necesarios, cada vez se basarán más en el uso de modelos de simulación de cultivos y en el desarrollo de sistemas de soporte de decisiones adaptados a las necesidades específicas de los agricultores y comunicados a través de la web.

Recuadro 35.1. Visualizando el futuro

Un agricultor en el año 2050 tiene la intención de sembrar el trigo el 1 de noviembre. El 15 de octubre, un robot de toma de muestras es enviado a los diferentes campos de la explotación en los que éste toma automáticamente muestras del suelo en diferentes lugares y produce mapas de nutrientes (nitrato, P, K) y contenido de agua en el suelo, que el agricultor compara con observaciones similares obtenidas hace dos semanas de un servicio de satélite al que está suscrito. El robot toma también algunas muestras que se embalan y se envían al centro regional de investigación para la determinación de patógenos del suelo o insectos. El mismo día, un avión no tripulado vuela sobre la finca y recoge imágenes de visible y NIR para mapear los rodales de malas hierbas en los campos que van a ser sembrados. A continuación, el agricultor consulta un DSS que muestra el contenido de agua del suelo estimado en los diferentes campos. Con esos datos y la previsión de las precipitaciones locales para las próximas dos semanas, el sistema se conecta con las páginas web de las compañías de semillas, recoge información sobre los diferentes cultivares disponibles, ejecuta un modelo de simulación del cultivo basado en la predicción climática estacional y compara las mejores opciones, teniendo en cuenta el precio de la semilla, los rendimientos esperados, los precios del producto y la disponibilidad local. El agricultor compra en línea la semilla necesaria.

El mismo DSS también construye un mapa de aplicación recomendada de N, P, K y herbicida de contacto y, tras consultar la base de datos de existencias en la finca, calcula las cantidades que hay que adquirir. El agricultor compara en línea los precios y condiciones de los diferentes proveedores y confirma la orden. De acuerdo con las previsiones meteorológicas se espera que no ocurran precipitaciones el 22 y el 23 de octubre, con lluvias después. Estos días son adecuados para la aplicación del N y el herbicida. El

20 de octubre se recibe un correo desde el centro regional de investigación aconsejando el uso de un insecticida junto con la semilla a una dosis dada. El agricultor confirma en línea el uso del insecticida que se registra en una base de datos externa de uso de plaguicidas.

El 22 de octubre el robot fertilizante pulverizador va a los campos y aplica urea en tasas variables dependiendo de la necesidad. También aplica herbicida sólo en los lugares donde se habían detectado previamente las malas hierbas. Después de realizado el trabajo el agricultor confirma en línea las cantidades de N y herbicidas utilizados en cada campo. Esta información va a las bases de datos externas sobre fertilización nitrogenada y uso de plaguicidas.

El 1 de noviembre el robot-sembradora es enviado a los campos para sembrar y aplicar P y K localizado a dosis variables. El robot-sembradora seguirá siempre el mismo camino que el resto de la maquinaria para evitar la compactación debida al tráfico.

35.7. SEGURIDAD ALIMENTARIA Y SALUBRIDAD DE LOS ALIMENTOS

Tras un fuerte aumento de los precios de los alimentos en 2008, la preocupación por la seguridad alimentaria, entendida como una situación en la que todos los seres humanos tengan acceso a alimentos suficientes y nutritivos, ha aumentado en todo el mundo. La seguridad alimentaria es ahora un lugar destacado en la agenda de muchos países que hacen planes para un futuro incierto, donde, al mismo tiempo que el comercio mundial de alimentos está alcanzando niveles históricos, las cuestiones de soberanía alimentaria relacionadas con la capacidad de cada país para ser autosuficiente en producción de alimentos son cada vez más importantes dado el clima político actual. El comercio de alimentos está equilibrando la oferta y la demanda de una manera eficaz y es el principal instrumento disponible para hacer frente a la inestabilidad de la producción causada por fenómenos meteorológicos extremos y por los cambios en la demanda de alimentos debidas a cambios en la dieta u otras características del desarrollo económico.

La salubridad alimentaria se refiere a cuestiones de salud desde el punto de vista de asegurar que los alimentos comercializados sean sanos y nutritivos. Los problemas de la producción de alimentos relacionados con la salud aparecen periódicamente (p.ej. la enfermedad de las vacas locas causada por prácticas de alimentación animal poco escrupulosas) y atraen la atención de una sociedad que cada vez es más ajena a los procesos de producción agrícola y alimentaria. Los episodios de contaminación de alimentos por agentes químicos o biológicos se producen periódicamente en muchos países y generan alarmas en materia de salubridad alimentaria. Una fuente importante de contaminación es el uso de aguas residuales tratadas para el riego que todavía se lleva a cabo en muchas áreas del mundo y que puede evitarse mediante el tratamiento adecuado del agua. Las alarmas debidas a la contaminación de los alimentos causan gran preocupación entre los consumidores y esto está

obligando a un mayor control y regulación de los procesos de producción de alimentos desde la explotación hasta el tenedor. Los agrónomos deben asegurarse de que los productos que salgan de la explotación sean siempre seguros para el consumo, siendo el principal problema el uso inadecuado de plaguicidas. Otro objetivo importante es mejorar las cualidades nutricionales de los alimentos producidos. El contenido de proteínas, aminoácidos esenciales, vitaminas y otros factores nutricionales debe ser mejorado en lo posible por la buena agronomía. Otro aspecto interesante se refiere a las interacciones positivas entre la nutrición y la salud de ciertos productos agrícolas como el vino tinto, las nueces y el aceite de oliva, entre otros, que han demostrado los beneficios relacionados con la salud, pero en el que el contenido de los productos químicos responsables de estos beneficios depende en parte de las condiciones de crecimiento. Por último, dada la creciente importancia de la gastronomía en las sociedades opulentas, los agrónomos deben centrarse más en cuestiones relacionadas con garantizar la calidad del producto desde el punto de vista gastronómico.

A pesar de que las predicciones pueden variar, se estima que la producción agrícola debe aumentar en un 70% para satisfacer la demanda de 9 mil millones de personas en 2050. ¿El mundo va a garantizar la seguridad alimentaria para todos en el año 2050? En primer lugar, es importante tener en cuenta que no todos los productos agrícolas se utilizan directamente para la alimentación. Alrededor del 10% se dedica a cultivos industriales, incluyendo los biocombustibles. El 90% restante se reparte entre los alimentos (65%) y producción animal (35%), lo que resulta en una eficiencia global de la producción de cultivos para alimentos de 0.65. Esta baja eficiencia es debida a la baja eficiencia de conversión de los animales, principalmente para la producción de carne. Aquí, hay amplias diferencias en la eficiencia entre las especies, siendo los pollos los más eficientes y el ganado vacuno el más ineficiente (Tabla 35.2). Sin embargo, los rumiantes explotan las tierras de pastos (que ocupan más superficie que la que utiliza la agricultura) que de otro modo no se utilizarían para la producción de alimentos y esto debe ser tenido en cuenta al discutir la producción de carne dentro de las evaluaciones globales de la producción de alimentos. Se han hecho propuestas para reducir el consumo de carne en los países desarrollados y esto podría tener un impacto en la seguridad alimentaria en el futuro. Por ejemplo, si la producción de carne se redujera a la mitad, la eficiencia global aumentaría de 0.65 a 0.,74; un aumento del 14% en calorías disponibles para los seres humanos. Un cambio tan drástico sería difícil de lograr y es dudoso que se lograran liberar todas esas calorías para los seres humanos, ya que el ganado consume también residuos y otros componentes no alimentarios, además de aprovechar los pastos. Por otro lado, hay ventajas claras relacionadas con la salud, de la reducción de la cantidad de productos de origen animal en la dieta humana, especialmente en los países de alto consumo, donde la obesidad es un problema cada vez mayor.

Otra área donde las mejoras contribuirán a la seguridad alimentaria en el futuro es la reducción de los desperdicios de alimentos. Se estima que hasta un tercio de la producción mundial de alimentos se pierde antes de que pueda ser consumida por los seres humanos. La naturaleza del desperdicio varía en las diferentes cadenas

tróficas pero en términos generales, las pérdidas de alimentos en las zonas pobres se debe principalmente a las pérdidas posteriores a la cosecha causadas por las plagas. Por el contrario, en los países ricos la mayoría de las pérdidas de alimentos se producen en el extremo de los consumidores. Aunque se están haciendo esfuerzos para reducir los desperdicioss, gran parte de ellos están relacionados con factores sociales y culturales que, como en los patrones de consumo de la carne, son difíciles de cambiar.

Tabla 35.2. Distribución de usos de cultivos alimentarios y de todos los cultivos hacia 2012. La eficiencia de conversión de energía se toma como 1 para el consumo directo humano. Usando esta Tabla se puede estimar la eficiencia general de la producción de cultivos a escala mundial para alimentación como 0.65, como la media ponderada de las eficiencias tomado la fracción de uso como factor de ponderación.

	Cultivos alimentarios	Total cultivos	Eficiencia
	Fracción usada	Fracción usada	
humanos	0.65	0.5915	1
cerdo	0.12	0.1092	0.1
vacuno leche	0.09	0.0819	0.4
vacuno carne	0.05	0.0455	0.03
pollo	0.05	0.0455	0.12
huevos	0.04	0.0364	0.22

¿Cómo puede entonces la Agronomía contribuir a la seguridad alimentaria en el futuro? Debemos hacer que los sistemas agrícolas actuales sean más sostenibles sin perder de vista la necesidad de intensificar la producción en las tierras de cultivo existentes. La opción de expandir la superficie cultivada tiene limitaciones ecológicas significativas y no va a ser sostenible ya que la mayoría de las mejores tierras ya se han puesto en producción. Por lo tanto, la intensificación sostenible de la producción mediante la introducción de nuevas técnicas adaptadas a las condiciones locales debe permitir seguir incrementando la productividad. Existen grandes oportunidades en todo el mundo para aumentar la productividad agrícola y la sostenibilidad mediante el uso de buena agronomía y unas prácticas de manejo de los cultivos apropiadas.

BIBLIOGRAFÍA

Fischer RA, Byerlee D, Edmeades GO (2014) Crop yields and global food security: will yield increase continue to feed the world? ACIAR Monograph No. 158. Australian Centre for International Agricultural Research, Canberra, Australia

Fresco LO (2016) Hamburgers in Paradise: the stories behind the food we eat. Princeton University Press, Princeton NJ, USA

Este libro es la traducción de "Principles of Agronomy for Sustainable Agriculture" (Springer). Supone un avance respecto al libro de Fitotecnia de los mismos autores al incluir algunos temas no tratados anteriormente como la recolección o la aplicación de productos fitosanitarios y al incorporar a coautores especialistas en los distintos capítulos. El libro incluye los principales aspectos de las tecnologías de la producción agrícola (siembra, fertilización, riego, etc.) poniendo énfasis en la sostenibilidad del sistema. Se ha organizado como un libro de texto para cubrir la enseñanza de la asignatura de Fitotecnia para estudiantes de grado. Puede servir también como manual básico para técnicos o agricultores avanzados.

Francisco J. Villalobos es Catedrático de Producción Vegetal de la Universidad de Córdoba. Se doctoró en la Universidad de Córdoba y fue luego postdoctoral Michigan State University. Su docencia e investigación se han centrado en la agronomía y en los modelos de simulación.

Elías Fereres es Catedrático de Producción Vegetal de la Universidad de Córdoba. Se doctoró en la U. de California en Davis donde luego trabajó durante seis años. Su labor docente e investigadora se ha dedicado a la agronomía, a las relaciones hídricas y al riego. Actualmente es Editor Jefe de la revista *Irrigation Science* y Presidente de la Real Academia de la Ingeniería de España.

www.mundiprensa.com

ISBN: 978-84-8476-524-0