



Métodos empíricos

para estimar la
velocidad de
infiltración en
suelos agrícolas
y cuencas
hidrológicas
pequeñas

Martín D. Mundo Molina

Métodos empíricos

**para estimar la
velocidad de
infiltración en
suelos agrícolas
y cuencas
hidrológicas
pequeñas**

S E R I E
**Las ciencias
sociales**
CUARTA DÉCADA

Métodos empíricos

para estimar la
velocidad de
infiltración en
suelos agrícolas
y cuencas
hidrológicas
pequeñas

Martín D. Mundo Molina



Esta investigación, arbitrada por pares académicos,
se privilegia con el aval de la institución coeditora.

628.164

M9233

Mundo Molina, Martín D.

Métodos empíricos para estimar la velocidad de infiltración en suelos agrícolas y cuencas hidrológicas pequeñas / por Martín D. Mundo Molina. -- 1ª ed. -- México : Universidad Autónoma de Chiapas : Miguel Ángel Porrúa, 2018.
101 p. : il. ; 14 × 21 cm. -- (Las Ciencias Sociales. Cuarta Década)

ISBN 978-607-524-214-9

1. Infiltración. 2. Tasa de infiltración del suelo. 3. Percolación de suelos.

Primera edición, octubre del año 2018

© 2018

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS

© 2018

Por características tipográficas y de diseño editorial

MIGUEL ÁNGEL PORRÚA, librero-editor

Derechos reservados conforme a la ley

ISBN 978-607-524-214-9

Coordinación de la edición: Unidad de Divulgación Científica de la Dirección General de Investigación y Posgrado de la UNACH

Parte de la producción fue financiada por el Programa Fortalecimiento de la Calidad Educativa P/PFCE-2016-07MSU0001H-01 de la Universidad Autónoma de Chiapas

Queda prohibida la reproducción parcial o total, directa o indirecta del contenido de la presente obra, sin contar previamente con la autorización expresa y por escrito de **MAPorrúa** en términos de lo así previsto por la *Ley Federal del Derecho de Autor* y, en su caso, por los tratados internacionales aplicables.

IMPRESO EN MÉXICO



PRINTED IN MEXICO

LIBRO IMPRESO SOBRE PAPEL DE FABRICACIÓN ECOLÓGICA CON BULK A 80 GRAMOS

www.maporrúa.com.mx

Amargura 4, San Ángel, Álvaro Obregón, 01000, CDMX

Presentación

La infiltración es un componente fundamental del ciclo hidrológico y su cálculo es indispensable para el diseño de obras hidráulicas tanto en ingeniería de regadíos, ingeniería hidrológica como en ingeniería hidráulica. Por tal razón este libro fue elaborado para profesionales de la ingeniería civil, ciencias agronómicas y ciencias del agua que necesiten estimar la velocidad de infiltración en suelos agrícolas o realizar balance de agua en cuencas pequeñas. También es útil para ingenieros recién egresados o estudiantes interesados en el tema.

El objetivo del autor es presentar varios métodos para estimar la velocidad de infiltración del agua en suelos agrícolas y cuencas hidrológicas pequeñas. Los métodos expuestos se clasifican de la siguiente manera: métodos directos, como el Infiltrómetro de Doble Cilindro (IDC), Simulador de Lluvia (SL) y Miniinfiltrómetro (MI); métodos empíricos indirectos, como el Índice \emptyset , Horton y Holtan; métodos indirectos con bases físicas, como el de Green y Ampt que se fundamenta en observaciones empíricas y algunos procesos físicos del fenómeno, y el método de Phillip basado en la teoría de flujo en medios porosos no saturados.

Este libro no es un manual, sin embargo, cada método es explicado de forma clara y sencilla para facilitar su aplicación en campo, exponiendo las limitaciones y ventajas de cada uno de ellos.

Así, la obra que el lector tiene en sus manos es de carácter práctico y utilitario, por tal razón no se desarrollan los elementos teóricos del fenómeno ni se explican los métodos más refinados como los de Teoría de la Infiltración, porque está fuera de los objetivos de este libro y requieren datos que no son fáciles de medir en campo o que sólo se obtienen a través de pruebas de laboratorio.

Con el fin de precisar el fenómeno, en el capítulo I se define el concepto de “infiltración”, se destaca su importancia y se explica el proceso físico del mismo. En el capítulo II se describen los factores que afectan a la infiltración como características y clasificación del suelo, relevancia de la textura, contenido de humedad inicial y de saturación, cobertura vegetal, aire atrapado, lavado de material fino, compactación y la importancia de la temperatura en el proceso. En el capítulo III se explica de forma breve las fuerzas actuantes en el movimiento del agua en suelos no saturados y se describen las características hidráulicas de suelos saturados y su interpretación teórica a partir de la Ley de Darcy. El objetivo de los capítulos II y III es que el lector tenga los conocimientos necesarios para conocer las variables que intervienen en el proceso de infiltración y disponer de un marco de referencia para entender los métodos que se exponen en los capítulos siguientes, así como sus limitaciones. En el capítulo IV se describen con detalle tres *métodos directos* para estimar la velocidad de infiltración en suelos agrícolas. En el capítulo V se exponen *los métodos indirectos* que estiman la velocidad de infiltración y que pueden ser aplicados en cuencas hidrológicas pequeñas. Finalmente en el apartado de conclusiones, se exponen algunas reflexiones finales sobre la necesidad de conocer estos métodos y su utilidad en campo, así como la relevancia práctica de los mismos.

En el entendido de que los métodos presentados no son precisos tanto por su carácter empírico como por sus evidentes limitaciones técnicas al no considerar todas las variables del proceso, sí es claro que nos aproximan a ciertas realidades del fenómeno y proporcionan una idea razonable de la “capacidad o velocidad de infiltración” de suelos agrícolas y cuencas hidrológicas pequeñas. Para proyectos específicos o que requieran de mayor exactitud el lector tendrá que recurrir a métodos más precisos no exentos de limitaciones prácticas.

Expreso mi sincero agradecimiento a los profesores e investigadores que leyeron y realizaron valiosas sugerencias a este libro: A Serge L. Tamari Wagner, Felipe Zatarain Mendoza, Patricia Elke Rodríguez Schaeffer, Eber Alberto Godínez Domínguez y Daniel Hernández Cruz.

Infiltración

DEFINICIÓN

Al movimiento multidireccional del agua dentro del suelo producido por fuerzas capilares y gravitacionales, con prevalencia hacia abajo, se le denomina infiltración.

IMPORTANCIA DE LA INFILTRACIÓN

En este libro se destaca la relevancia del fenómeno de infiltración desde el punto de vista hidrológico y agrícola. En el primer caso cuando llueve en una cuenca el volumen total precipitado es distinto al volumen total escurrido, la diferencia es la cantidad de agua infiltrada, evaporada, retenida por el follaje o almacenada por tiempos cortos en las grandes o pequeñas depresiones del terreno. Esto representa el balance del ciclo hidrológico en la naturaleza. Si se piensa en una cuenca con baja densidad de urbanización podría darse el caso de que el volumen infiltrado sea mayor que el volumen escurrido (Aparicio, 1989; Chávarri, 2004). Estos balances del ciclo hidrológico se pueden estimar con técnicas hidrológicas calculando la cantidad de agua total que se precipita (P), evapora (Ev), escurre (E) o infiltra (F). Así, si se conoce en una cuenca el promedio anual de agua precipitada, evaporada y escurrida, entonces se puede saber la cantidad de agua anual infiltrada. En su caso, conocido F , P y Ev es posible estimar el volumen de agua (E) que escurre para el almacenamiento

de presas con fines agrícolas, generación de energía o dotación a poblaciones. Por lo tanto, conocer con precisión las variables E , Ev , P y F en una cuenca, no sólo permite diseñar, sino también operar las obras hidráulicas en forma correcta en los aprovechamientos hidráulicos superficiales.

En el segundo caso, los balances hidrológicos centrados en tres variables: almacenamiento de agua en las presas, infiltración y evapotranspiración (ET), son indispensables para garantizar una adecuada producción en las zonas agrícolas bajo riego. La función primordial del riego es mantener la suficiente cantidad de agua en el suelo de tal manera que ésta sea fácilmente aprovechable por las plantas, ya que el desarrollo vegetativo de los cultivos depende de la facilidad con la que el agua puede extraerse del suelo. Sin embargo, cuando se riega “por gravedad” el agua que se aplica en demasía no es aprovechada por las plantas, este exceso de agua de riego se pierde debido a la infiltración profunda. De allí la importancia de determinar con certeza la velocidad de infiltración del agua en el suelo con el fin de proporcionar a las plantas el agua necesaria en función del tipo de suelo en el que se cultivan, sin desperdiciarla. Esto es relevante en un sector como el agrícola que no sólo es el mayor consumidor de agua en México, sino también en el mundo (Mundo, 2009). En el caso de México de cada 100 litros de agua usada, 80 aproximadamente se utiliza con fines agrícolas pero se pierde aproximadamente el 50 por ciento por infiltración excesiva (Mundo, 2014).

EL PROCESO DE INFILTRACIÓN

El proceso de infiltración es un fenómeno muy complejo debido a que el suelo no tiene características físicas uniformes. Su textura, estructura, densidad aparente, densidad real, porosidad, con-

ductividad hidráulica entre las más importantes, son normalmente heterogéneas (Kramer, 1974). En consecuencia para entender, explicar y modelar el proceso es necesario establecer hipótesis como las que se enuncian a continuación.

Supóngase que el suelo es plano, homogéneo en su perfil vertical y además que el manto freático está lo suficientemente lejos de la superficie. Bajo estos supuestos y considerando un área superficial también homogénea y pequeña, cuando llueve el proceso de infiltración es el siguiente (Aparicio, 1989): la porción de suelo considerada inicialmente está seca, al presentarse la lluvia en un tiempo t_1 , toda el agua se infiltra; si la duración de la tormenta (entendida como la cantidad de lluvia precipitada en un tiempo determinado) es t_2 mayor que t_1 , el suelo tendrá que humedecerse en su totalidad hasta su saturación, lo que originará la formación de charcos. Lo ocurrido en t_1 se denomina capacidad de infiltración del suelo o velocidad de infiltración, y lo ocurrido en t_2 , tiempo de encharcamiento.

En el tiempo t_1 las fuerzas capilares predominan sobre las gravitacionales y la capacidad de infiltración va en aumento; hasta después de t_2 el fenómeno se invierte y las fuerzas gravitacionales predominan sobre las capilares, entonces la capacidad de infiltración disminuye. Si la intensidad de la lluvia es mayor que la capacidad del suelo para desalojarla, la infiltración no dependerá de los cambios de la intensidad de lluvia en el tiempo.

Cuando las fuerzas gravitacionales predominan sobre las fuerzas capilares, el agua se mueve a través del suelo de forma más o menos uniforme y la capacidad de infiltración se hace constante.

Supóngase ahora que la lluvia disminuye de tal forma que la capacidad de desalojo del agua en el suelo es mayor que la

intensidad de la lluvia, si hay charcos en la superficie, el agua se infiltrará, así la superficie del terreno quedará libre de charcos y el contenido de humedad (frente húmedo) se difunde, es entonces cuando las fuerzas capilares empiezan a predominar sobre las gravitacionales y el frente húmedo empieza a avanzar hacia arriba, hasta que la superficie pierde su saturación. Este modelo simplificado del fenómeno de infiltración no sólo permite entender el movimiento del agua en el interior del suelo, sino también el proceso de saturación, encharcamiento y desagüe que dependen de los factores que se discuten en el capítulo siguiente.

Factores que afectan a la infiltración

CARACTERÍSTICAS DEL SUELO

El suelo es un sistema muy complejo. En general un volumen determinado de suelo está compuesto de materia sólida, líquida y gaseosa; contiene también múltiples organismos vivientes (bacterias, hongos, algas, protozoos, insectos), que afectan directamente su estructura.

La parte sólida puede ser mineral u orgánica, los minerales son partículas de varios tamaños, formas y composición química, la parte orgánica incluye residuos en diferentes etapas de descomposición y organismos en estado de vida activa.

El agua que contiene el suelo representa su fase líquida, que llena una parte o la totalidad de los espacios vacíos entre las partículas sólidas, que tienen dos variantes: composición química y la libertad con la que se mueve en el medio.

Los espacios porosos que el agua no ocupa es sustituido por aire o vapor de agua, ésta es la fase gaseosa del suelo. Por estas razones el suelo es trifásico.

CLASIFICACIÓN

Las fases y la composición del suelo generan que éste tenga propiedades intrínsecas distintas en distancias relativamente cortas. Si una masa de suelo de ciertas dimensiones pudiese separarse en sectores, se comprobaría que éstos difieren en sus propiedades

físicas, incluso en espacios muy cortos entre sí, por lo que no resulta fácil hacer una representación única y rigurosa de dichas masas sectorizadas y tampoco clasificar sus propiedades físicas de forma homogénea. Si a cada masa sectorizada se le realizaran pruebas de infiltración, se podría probar que cada una de ellas tiene diferentes capacidades.

El suelo, al ser un sistema trifásico, favorece que contenga un número ilimitado de componentes distribuidos al azar en el perfil, condicionado por los tamaños y la disposición de sus elementos sólidos. Las fases líquida y gaseosa dependen del volumen y disposición geométrica de los huecos o vacíos existentes en la masa de suelo, esta condición impide hacer una clasificación rigurosa y homogeneizar sus capacidades de infiltración, sin embargo, se han podido establecer algunas características físicas que afectan dicha capacidad, entre los más importantes se puede enunciar las siguientes: textura, contenido de humedad inicial, contenido de humedad de saturación, cobertura vegetal, aire atrapado, lavado de material fino, compactación y cambios de temperatura.

TEXTURA

La cantidad en porcentaje de arena, limo o arcilla definen la textura de un suelo en su fase sólida. Los suelos se pueden clasificar basados en el triángulo de texturas como: arenosos, limosos o arcillosos (véase apéndice A).

En términos generales los suelos se dividen en suelos de textura fina (arcilla y limos) y suelos de textura gruesa (arenas). Los suelos arenosos son menos complejos en su estructura, contiene menos del 15 por ciento de limo y arcilla y tienen un gran volumen de espacios porosos (no capilares), lo que permite una rápida infiltración del agua.

Los suelos arcillosos se encuentran en el extremo opuesto, son más complejos en su estructura que los arenosos, porque contienen más del 40 por ciento de partículas de arcilla y menos del 45 por ciento de arena o limo. Las partículas de arcilla suelen estar consolidadas, formando gránulos complejos con menores espacios porosos que los arenosos, esto les proporciona mayor capacidad en la retención de agua que genera una velocidad de infiltración lenta. A la capacidad del suelo para retener agua se le denomina “sazón” o madurez y ésta depende en buena medida de su estructura y textura.

Los migajones contienen en porcentaje cantidades más o menos iguales de arena, limo o arcilla y se les denomina también “suelos francos”; éstos tienen propiedades intermedias entre arcilla, limo y arena. Para la agricultura estos suelos son los más importantes, debido a su mayor equilibrio entre las tres componentes fundamentales de su textura. La importancia de la textura radica en la influencia directa sobre la capacidad de infiltración y el tiempo de encharcamiento (t_p). En los suelos finos los t_p son relativamente cortos y en los gruesos, relativamente grandes.

CONTENIDO DE HUMEDAD INICIAL

El contenido de humedad inicial del suelo es aquel que posee antes de la saturación, se define como la relación del peso de agua contenida con respecto al peso del suelo seco multiplicado por 100, por lo tanto es una magnitud escalar, dado en porcentaje.

En los suelos relativamente secos, la poca humedad está distribuida en películas alrededor de las partículas. La película más cercana a la partícula de suelo está fuertemente adherida a ella. Cuando el suelo se humedece, la película de agua alrededor de la partícula va aumentando de espesor hasta que, finalmente, las

fuerzas de cohesión que sostienen las películas de agua son menores que la fuerza de gravedad y parte del agua escurre por los poros. Así, cuando la película de agua “engruesa”, la fuerza de gravedad provoca que ésta se mueva con más libertad.

La importancia del contenido de humedad inicial se explica a continuación. Si se denomina θ a la humedad del suelo y se parte del supuesto que se tiene un mismo suelo en dos tiempos distintos t_1 y t_2 pero con diferentes contenidos de humedad θ_1 y θ_2 , respectivamente, donde $\theta_2 > \theta_1$ para una misma tormenta, se puede probar que para el suelo con contenido de humedad θ_1 pequeño en t_1 , las fuerzas capilares predominan sobre las gravitacionales y la capacidad de infiltración es grande.

Para el suelo con contenido de humedad $\theta_2 > \theta_1$ en t_2 , el fenómeno se invierte, las fuerzas gravitacionales predominan sobre las capilares y la capacidad de infiltración disminuye. Así la diferencia en el contenido de humedad inicial provoca velocidades y volúmenes distintos de infiltración.

CONTENIDO DE HUMEDAD DE SATURACIÓN

El contenido de humedad de saturación del suelo, depende de la cantidad de lluvia que éste recibe; si la intensidad de lluvia es menor que la capacidad de infiltración de suelo, no se satura. En caso contrario el suelo se saturará. Sin embargo el tiempo que dura la lluvia tiene gran relevancia. Para una tormenta dada, el suelo recibirá un volumen de infiltración determinado, si la lluvia se prolonga el contenido de humedad del suelo será cada vez mayor hasta alcanzar su saturación. El contenido de humedad de saturación del suelo es determinante en su capacidad de infiltración y en el tiempo de encharcamiento.

Si el contenido de humedad de saturación es mayor, más rápido será el tiempo de encharcamiento y la capacidad de infil-

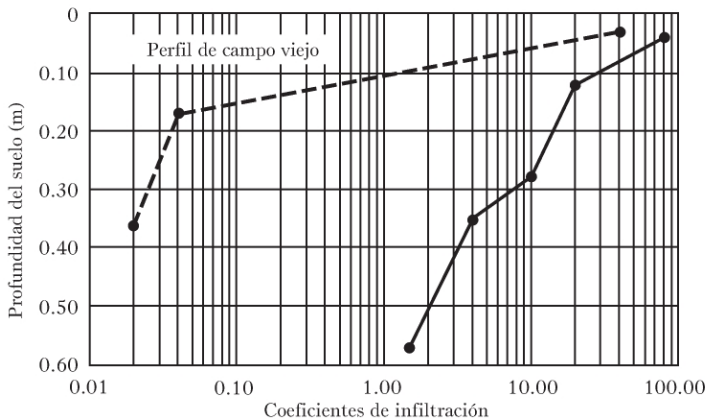
tración disminuye; si el contenido de humedad de saturación es menor, el tiempo de encharcamiento se alcanza más lentamente y la capacidad de infiltración aumenta.

COBERTURA VEGETAL

La cobertura vegetal es un factor muy importante en la reducción del tiempo de escurrimiento, en la retención de agua y la capacidad de infiltración del suelo (el tipo de raíz, densidad y profundidad juega un papel relevante en el proceso). Si la cobertura vegetal es muy densa, ésta puede tener mayor relevancia que la textura en el fenómeno de infiltración.

Un ejemplo de la aseveración anterior se tiene en la comparación de los coeficientes de infiltración en dos campos contiguos; la figura 1 muestra las curvas de un suelo forestal y un suelo erosionado, donde los coeficientes de infiltración son notablemente distintos.

FIGURA 1
COEFICIENTES DE INFILTRACIÓN



Fuente: Bayer *et al.*, 1980.

Otras características relevantes de los suelos con buena cobertura vegetal son: aporta una mayor rugosidad del terreno que hace disminuir la velocidad del escurrimiento superficial del agua favoreciendo la infiltración; el sistema radicular proporciona soltura al suelo, al descomponerse genera mayores cavidades incrementando la infiltración; una mayor densidad en la cobertura vegetal origina mayor cantidad de materia orgánica, por lo tanto existe mayor cantidad de organismos vivientes que dan soltura al suelo y provocan espacios que favorecen la capacidad de infiltración.

AIRE ATRAPADO

El suelo no es una masa uniforme, compacta, sin movimiento, por el contrario en su interior puede alojar una cantidad grande de organismos vivientes que se mueven y desarrollan en él, tanto vegetales como animales. Éstos consumen oxígeno y producen gases como el bióxido de carbono, los cuales se mueven hacia el exterior cuando se incrementa la temperatura y quedan atrapados en las dos clases de poros del suelo: los poros entre gránulos y los poros del mismo. Por otro lado está el aire atrapado en el suelo que se origina en el intercambio gaseoso que se da entre éste y la atmósfera. Los gases producidos al interior de la masa de suelo y el aire atrapado pueden reducir el área efectiva de los poros y provocar una menor tasa de infiltración, por lo tanto son capaces de reducir el contenido de humedad de saturación del mismo.

LAVADO DE MATERIAL FINO

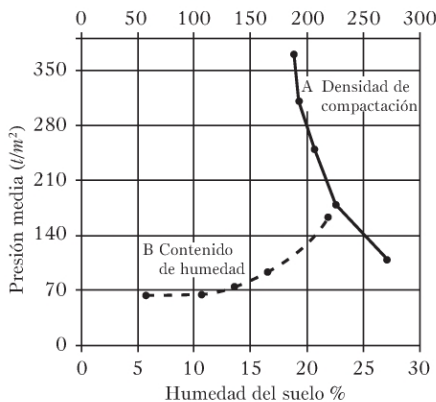
El suelo sufre erosión natural generada por el sol, el aire, el viento y los cambios de temperatura, especialmente en la época de estiaje; la precipitación pluvial erosiona el suelo de forma más intensa en la época de lluvias. La erosión es la disgregación

de las partículas de las capas de suelo más superficiales, produciendo material fino o muy fino que en época de lluvia son “lavados” principalmente hacia las partes más bajas del terreno o incluso arrastrados hacia el interior del suelo ocupando espacios intersticiales que pueden reducir sensiblemente la capacidad de infiltración del mismo.

COMPACTACIÓN

Existen muchos factores que provocan la compactación del suelo, entre los más comunes se pueden enunciar los siguientes: secado, contracción por disminución de temperatura, acción de fuerzas mecánicas como vehículos, tránsito de animales o de personas y compactación debido a la lluvia. Si el suelo se compacta cambia su densidad al disminuir su volumen. El aumento de densidad es función del esfuerzo de compactación y del contenido de agua como se puede observar en la figura 2, la curva A

FIGURA 2
EFECTOS DE LA PRESIÓN EN LA COMPACTACIÓN DEL SUELO



Fuente: Baver *et al.*, 1980.

muestra que se pierde humedad en forma exponencial al aumentar la fuerza de compactación, por lo tanto se reduce drásticamente la capacidad de infiltración del suelo.

CAMBIOS DE TEMPERATURA

La temperatura (t) tiene efectos muy intensos, principalmente en las propiedades físicas de una masa de suelo. Por ejemplo, los cambios bruscos de t pueden provocar la disgregación en partículas finas que se “lavan” cuando llueve y obstruir su porosidad, disminuyendo la capacidad de infiltración. Por otra parte, la capacidad de retención de agua del suelo disminuye con el aumento de t . Este fenómeno se produce porque al aumentar t , la viscosidad del agua disminuye (aproximadamente del orden del doble entre 0 y 25°C). Al disminuir la viscosidad se incrementa su velocidad, disminuyendo así la capacidad de retención del agua.

Por otra parte, la actividad de muchos microorganismos alcanzan su máxima actividad entre los 25 y 30°C (por debajo o por encima de ese rango la actividad de éstos se decrementa). Se ha comprobado que a mayor actividad de los microorganismos mayor es la capacidad de infiltración del suelo.

Relación agua-suelo

CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS

El agua contenida en el suelo rara vez está en reposo, el movimiento se realiza de zonas con gradientes de potencial hídrico mayor a zonas con gradientes de potencial hídrico menor, asociada a las fuerzas gravitacionales y capilares. Las fuerzas gravitacionales y capilares provocan que el agua tenga un movimiento multidireccional, sin embargo, para simplificar su representación matemática vectorial en un plano cartesiano, dicho movimiento se simboliza en tres ejes direccionales: x , y , z .

Así, el movimiento del agua en el interior de una masa de suelo está definida por las propiedades o características hidráulicas del mismo, las más importantes son: tensión superficial, capilaridad, conductividad hidráulica y capacidad de infiltración. La tensión superficial es la propiedad de un líquido en la interfase “líquido-gas”, en la cual las moléculas de la superficie del agua soportan fuerzas de tensión debido a la cantidad de energía necesaria que dicha superficie emplea para incrementarse por unidad de área. Por esta razón una masa de agua, acomodándose al área mínima forma gotas esféricas. La tensión superficial es una “fuerza” que se mide en Newton por milímetro de longitud de superficie que el agua es capaz de soportar. Por su parte, la capilaridad es un fenómeno que se debe a la tensión superficial, y es la razón por la que un líquido asciende por tubos de pequeño diámetro o por “láminas” de suelo muy próximas. La

conductividad hidráulica (CH) es la capacidad que el suelo tiene de conducir agua bajo un gradiente hidráulico unitario. La CH saturada de campo (Kfs) es la conductividad hidráulica saturada de un suelo con aire atrapado. Existen varios métodos para estimar la CH que pueden consultarse en Martínez (1992), Martínez *et al.* (1996) y Porta (1999). Finalmente, la capacidad de infiltración es una medida de la velocidad con la que el agua se infiltra en el suelo.

Las características hidráulicas del suelo dependen en gran medida de su textura, es decir, de la cantidad de arena, limo o arcilla que contenga. Por esa razón el movimiento del agua en el suelo es distinto en textura gruesas comparada con los de texturas finas ya que los primeros son menos complejos en su estructura; esta característica condiciona la tasa de flujo ascendente o descendente, que es notablemente distinta en ambos tipos de suelo. Por ejemplo, la velocidad de infiltración (flujo descendente) es mayor en suelos arenosos que los arcillosos y la difusión del frente húmedo (flujo ascendente), también. Así, el flujo ascendente, es decir, el que ocurre después del tiempo necesario cuando una tormenta cesa, y ya no hay charcos sobre la superficie del suelo, se difunde como un frente húmedo en contra de la fuerza de gravedad, es decir hacia arriba (eje y), porque predominan las fuerzas capilares. Según Rijtema (1965) estimó que el flujo ascendente en suelos de textura franco arenosos con humus y con un nivel freático de 60 cm y un potencial matricial de 100 cm es de 20 mm/día, pero sólo es de 2 mm/día en suelo de textura fina. Con un nivel freático de 90 cm los flujos se reducían a 0.8 mm/día en ambos suelos; para efectos prácticos de riego si el nivel freático no tiene más de 1 m de profundidad el flujo ascendente debería en teoría ser útil para la subirrigación de los cultivos.

Flujos en suelos no saturados

Debido a que el objetivo de este libro es de carácter utilitario, no se desarrollará la teoría de flujo en suelos no saturados, sólo se hará una descripción cualitativa.

A continuación se enuncia de forma breve las principales fuerzas actuantes en el movimiento del agua en suelos no saturados, las razones y el alcance de su movimiento. En suelos saturados la gravedad controla el gradiente del potencial hídrico mientras que en los suelos no saturados dicho gradiente es controlado por las fuerzas capilares y la tensión de humedad, donde el agua se mueve en películas que rodean las partículas del suelo. La explicación teórica del flujo en suelos no saturados es actualmente insatisfactoria porque el problema del movimiento del agua es más complicado y aún no está resuelto. Sin embargo, como ya se ha enunciado en apartados anteriores, el movimiento del agua depende del cambio de tensión en una distancia determinada dentro de la masa de suelo. A mayor diferencia de tensión entre dos puntos corresponde un movimiento mayor del agua, aunque en general no es un movimiento grande o de mucha importancia. Varios resultados experimentales indican que el agua no puede moverse muy lejos por capilaridad dentro de los suelos no saturados: 30 o 40 cm hacia arriba o hacia abajo porque la conductividad desciende muy rápido. El descenso rápido de la conductividad hidráulica se produce debido a que los poros grandes quedan vacíos primero, reduciendo de forma relevante la sección transversal disponible para el flujo líquido; cuando se rompe la continuidad de las películas de agua deja de producirse el flujo líquido. Así, el proceso de infiltración unidimensional (eje y) es uno de los aspectos más estudiados en los suelos no saturados. Las soluciones dadas por Parlange *et al.* (1982)

para potencial constante en la superficie, así como la tasa de infiltración para caudal constante estudiado por Milly (1986) sólo son dos de los muchos casos estudiados sobre el flujo en suelos no saturados.

Flujos en suelos saturados

La teoría del movimiento del agua en suelos saturados se basa en la Ley de Darcy, la cual afirma que: “la cantidad de agua que pasa por unidad de sección transversal de suelo es proporcional a la diferencia de su carga hidráulica”. Darcy elaboró su teoría en 1856, después de culminar su experimento que se reproduce esquemáticamente en la figura 3 (Juárez *et al.*, 1985). Como se puede ver, Darcy colocó filtros de material térreo a los que agregó agua para investigar las características del flujo y el movimiento del líquido a través del suelo y encontró que, para velocidades suficientemente pequeñas, el gasto a través del medio queda expresado por (Juárez *et al.*, 1985):

$$Q = dV/dt = -kAi \text{ (cm}^3\text{/s)} \quad (3.1)$$

Donde A es el área total de la sección transversal del filtro, k es el coeficiente de permeabilidad, i es el gradiente hidráulico del flujo, medido con la expresión:

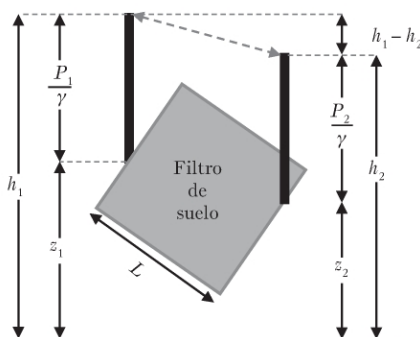
$$i = (h_1 - h_2)/L \quad (3.2)$$

En donde h de la figura 3 y ecuación (3.2) es la carga total del sistema (despreciando la carga de velocidades porque son muy pequeñas), z en una altura de referencia respecto a un plano horizontal de comparación y $\frac{p}{\gamma}$ es la carga de presión.

El potencial de presión y el potencial de gravedad se expresa de la siguiente manera:

$$\phi_h = \phi_p + \phi_g \quad (3.3)$$

FIGURA 3
ESQUEMA DEL EXPERIMENTO DE DARCY



Fuente: Juárez *et al.*, 1985.

La suma de estos dos potenciales se denomina potencial hidráulico y se designa por el símbolo ϕ_h . Por lo general el potencial de presión incluye el potencial de sobrecarga, pero éste puede incluirse como un término separado.

La presión se debe al peso del agua, pero si la presión del gas difiere en grado apreciable de la que existe en el punto de referencia, será necesario un término aparte.

Para efectos prácticos en las ecuaciones anteriores se usan unidades de altura hidrostática. Así, en términos de altura hidrostática, la ecuación 3.3 se puede escribir como:

$$h = z + \frac{p}{\gamma} \quad (3.4)$$

Donde z es igual a cero justo por encima del nivel freático; la altura hidrostática h es positiva por debajo del nivel freático y negativa por encima. Como ya se ha enunciado las velocidades son muy pequeñas en el interior de la masa de suelo, por lo tanto la carga de velocidad es despreciable.

Por otro lado, la ecuación de conservación de masa en su versión cinética, establece que:

$$Q = vA \quad (3.5)$$

Donde Q es el caudal, A es el área de la sección transversal del filtro y v la velocidad media del flujo.

Sustituyendo la ecuación 3.5 en la ecuación 3.1 queda:

$$v = -ki \quad (3.6)$$

Apoyándose en la ecuación 3.2:

$$v = -k(h_1 - h_2)/L \quad (3.7)$$

Y en la ecuación 3.3:

$$v = -k(\Delta\phi/\Delta z) \quad (3.8)$$

Donde el signo negativo que aparece en las ecuaciones sirve para hacer positiva la intensidad del flujo, pues el líquido fluye de puntos de mayor a menor potencial, lo que da origen a gradientes i de signo negativo.

Conviene aclarar que en la ecuación 3.2 la diferencia $(h_1 - h_2)$ es la pérdida de energía del flujo en la distancia L , que se transforma en calor, en sentido estricto esa pérdida debería escribirse como:

$$h = z + \int_{p_0}^p (dp/\gamma) \quad (3.9)$$

Donde γ es la presión entre un valor inicial p_0 y el valor p a la altura z . Sin embargo no es grave ignorar la variación del peso específico respecto a la distribución de presión, considerando a γ constante.

Regresando a las ecuaciones 3.6 y 3.7 que son equivalentes, se puede deducir que, en el intervalo donde la Ley de Darcy es aplicable, la velocidad del flujo es directamente proporcional al gradiente hidráulico (Darcy construyó sus filtros de arena fina, donde se produce flujo laminar, por lo menos mientras las cargas hidráulicas no sean “excesivas”); si en un filtro de arena el flujo es laminar entonces en suelos más finos, como mezclas de limo-arcilla o arcillas puras, el agua circula a velocidades mucho menores, donde es necesariamente laminar. Por esa razón si se desea repetir el experimento de Darcy se recomienda que se tenga cuidado no utilizar las ecuaciones de este apartado en experimentos donde se utilicen partículas muy gruesas como gravas o boleas, o incluso arenas gruesas, porque se puede generar flujo turbulento y no cumplir con las condiciones originales del experimento.

Permeabilidad o conductividad hidráulica

En la ecuación de Darcy el coeficiente k se denomina “permeabilidad del suelo”, es una constante física de proporcionalidad cuyas unidades son de velocidad (cm/h). Así, la permeabilidad del suelo se define como la velocidad del agua a través de éste, cuando está sujeto a un gradiente hidráulico unitario. En otros términos, es una especie de “conductividad hidráulica” que se debe entender como la velocidad efectiva del flujo cuando el gradiente hidráulico es la unidad.

La conductividad hidráulica k depende en gran medida de los factores expuestos en el capítulo II y de la calidad del agua, por ejemplo, de la salinidad y alcalinidad. Así, $k \leq 0.0025$ (cm/h) representa un suelo menos permeable y $k \geq 0.25$ (cm/h) representa un suelo más permeable, según los experimentos de laboratorio realizados por Smith *et al.*, 1946. En el caso de suelos agrícolas una conductividad hidráulica inferior a 0.25 cm/h indica que están mal drenados, mientras aquellos cuya conductividad es superior a 25 cm/h no son capaces de conservar suficiente agua para que las plantas crezcan bien.

Métodos directos para medir la velocidad de infiltración

Desde un punto de vista estricto no existen mediciones directas de velocidad de infiltración. Una medición directa en ingeniería o en ciencias aplicadas es aquella que se efectúa a través de un dispositivo o artefacto que mediante algún sistema de información el usuario puede obtener, a través de una pantalla, la variable deseada sin ningún proceso posterior de cálculo. No ocurre así con la estimación de la velocidad de infiltración en suelos, ya que si se utiliza un dispositivo para medir la tasa de infiltración siempre se tiene un proceso posterior de cálculo. Por tal razón las mediciones directas de velocidad de infiltración se deben entender aquí como aquellas que se efectúan por medio de dispositivos manuales para obtener datos que una vez procesados permiten conocer la relación de una lámina de agua que se infiltra en el tiempo. En este capítulo se expondrán tres métodos directos para estimar la capacidad o velocidad de infiltración del suelo: Infiltrómetro de doble cilindro, infiltrómetro de minidisco (miniinfiltrómetro) y simulador de lluvia. El primer método realiza una medida local o “puntual” de la tasa de infiltración del agua en el suelo, para áreas grandes se sugiere realizar varias pruebas distribuidas de manera adecuada según los tipos de suelos (previamente clasificados) de la zona de estudio. El segundo puede ocupar hasta 40 m² de superficie, no es exactamente puntual, pero conviene igual que el primer método seleccionar varios sitios de muestreo en función de los tipos de

suelo existentes. El tercer método, al igual que el primero, es una medida puntual y deben ejecutarse varias pruebas según los tipos de suelo en la zona de estudio, utilizando una distribución espacial que representen toda la superficie como se enuncia en el apartado titulado “Instalación”. Por su facilidad de aplicación y el poco volumen de agua que emplea en cada experimento, el tercer método es ampliamente recomendado. Finalmente, conviene enunciar que en el capítulo I, en el subíndice “importancia de la infiltración” el concepto de infiltración se denota con la variable F , mientras que en los capítulos IV y V, la velocidad o capacidad de infiltración se denota con las variables I , F , I_c , fp , con el fin de respetar la originalidad de los autores.

INFILTRÓMETRO DE DOBLE CILINDRO (IDC)

Las velocidades de infiltración en suelos agrícolas con el IDC se deben de tomar con mucho cuidado debido a que la información que proporciona es puntual y la capacidad de infiltración del suelo muestreado está limitado por las fronteras de ambos cilindros, que obligan al agua fluir en la dirección del eje $-y$, es decir, hacia abajo con un frente húmedo perpendicular a la superficie del suelo; por otro lado, la carga hidráulica en los cilindros y la alteración del suelo por el hincado de los mismos influye en la tasa de infiltración (Ponce, 1989; López *et al.*, 1986). A pesar de ello este método proporciona datos de tasas de infiltración razonables, de una manera sencilla, menos complicada que el método de simulación de lluvia. Por otra parte, los cilindros se construyen con relativa facilidad, sin complicaciones notables para adaptarlos al campo. Se recomienda usar el IDC si en la parcela donde se realizarán las pruebas se va a utilizar el método de riego de inundación total, como “cuadros”, “bordos a nivel” o

“melgas”. Además debe tenerse en cuenta: no realizar las pruebas de velocidad de infiltración en terrenos recién regados; el sitio escogido deberá distar 50 m aproximadamente de vías de comunicación, canales de riego, obras hidráulicas, drenes, cuerpos de agua o de cualquier otro lugar sometido a labores distintas a las agrícolas; no deberán colocarse los cilindros sobre el lomo de los surcos, el área escogida será en lo posible plana.

Equipo

Para construir un IDC como el que se muestra en la figura 4 se necesitan materiales y herramientas que se enuncian a continuación (SARH, 1978):

FIGURA 4
INFILTRÓMETRO DE DOBLE CILINDRO



Fuente: Ibañez *et al.*, 2009.

1. Tres metros de lámina galvanizada lisa No. 14 o 16 de 90 cm de ancho, con la cual se construirán los cilindros. Se corta la lámina para producir dos tiras, una de 2 m de longitud y la otra de 1 m. Luego se corta nuevamente cada tira, para que cada una de ellas quede con una altura de 30 cm.

Así, con cada tira se forman dos cilindros, uniendo los extremos, empatando en el primer caso las puntas a una longitud de 1.88 m y la segunda a 0.94 m soldándolas en forma de “anillos”. No existe un estándar en cuanto a los tamaños de los IDC (Blanco, 1999), sin embargo se sugiere que las dimensiones de los cilindros deben quedar de 60 y 30 cm de diámetro y una altura de 30 cm, respectivamente. Para darles rigidez se debe reforzar la parte superior con una tira de $\frac{1}{8}$ de pulgada de fierro soldado, alrededor de ambos cilindros.

2. Un tornillo micrométrico con una base de soporte, para ser colocado en el cilindro de menor diámetro.
3. Un martillo metálico con peso de 7 kg, aproximadamente.
4. Un cronómetro.
5. Dos recipientes, para transportar 400 l de agua.
6. Dos cubetas, con capacidad de 5 a 10 l.
7. Una manguera de plástico, de 3 a 5 m de longitud y 2 cm de diámetro aproximadamente.
8. Una barrena de gusano.
9. Dos m² de plástico o polietileno.
10. Una tabla con broche, goma, lápiz, para las anotaciones.
11. Una pala.
12. Cinta métrica o regla graduada.
13. Una placa de acero de 40 × 40 cm, para sobreponerlos en los cilindros y servir como área de golpeo para el hincado de los IDC.

Instalación

Se instalarán los dos cilindros tomando en cuenta las siguientes consideraciones: localizar el sitio de muestreo. Éste deberá ser representativo del suelo al que se pretende evaluar, evitando

zonas de grietas, zonas con manto freático cercano a la superficie del suelo, madrigueras de hormigas o topos y zonas compactadas por el tránsito de personas, maquinaria agrícola o animales. Para un registro adecuado y representativo de las características del suelo, se deberán realizar las pruebas en varios sitios, por ejemplo: si son dos puntos éstos deben estar opuestos, si son tres deberá formarse un triángulo, si son cuatro deberá formarse un cuadrado, si son cinco deberá formarse dos triángulos unidos por uno de sus vértices y así, procurando formar figuras geométricas que representen toda la superficie. Cada punto en una serie de suelo, entendiendo como serie de suelo a una clase específica, con un conjunto similar de características físicas, químicas y biológicas.

Se instalará el IDC del siguiente modo:

1. Se verifica que el suelo esté plano. Luego se coloca el cilindro de menor diámetro sobre la superficie de éste. Se acomoda la placa de acero sobre el cilindro y con el martillo se golpea la placa para introducir dicho cilindro poco a poco, con golpes constantes y uniformes. Se debe evitar alterar el suelo al hincar el cilindro, por ejemplo rompiendo su estructura fuera del sitio de contacto entre éste y la lámina. El IDC se introducirá hasta una profundidad entre 10 y 15 cm, aunque Bouwer (1986) considera que es suficiente con 5 cm.
2. Se realiza la misma operación con el cilindro de mayor diámetro, tratando de mantener la misma distancia entre todos los puntos de ambos cilindros de manera coaxial.
3. Se coloca el tornillo micrométrico sobre el cilindro de menor diámetro y se calibra en cero con la reglilla.
4. El IDC deberá estar colocado verticalmente, si hay inclinación en cualquiera de los dos cilindros puede existir flujo horizontal (lateral) alterando los resultados. De acuerdo con Youngs

(1987a y 1987b) es imposible evitar el flujo horizontal por completo, pero debe minimizarse. Si se coloca un solo cilindro para realizar la prueba, el flujo lateral será más evidente, como se observa en la figura siguiente.

FIGURA 5
FLUJO LATERAL



Fuente: Godagnone *et al.*, 2012.

Llenado de los cilindros

Antes y durante el proceso de llenado de los dos cilindros, deberán tenerse en cuenta las siguientes indicaciones:

1. Es recomendable haber colocado el plástico en el fondo de ambos cilindros antes de su llenado, para evitar la alteración de las condiciones naturales del suelo.
2. Procure no derramar agua fuera del cilindro externo, use la manguera para controlar mejor el proceso de llenado.
3. El agua para el llenado del IDC deberá ser la que se utilizará en el riego. Se recomienda que la temperatura del agua sea similar a la del suelo (Bouwer, 1986).

4. Una vez lleno el espacio entre el cilindro externo e interno debe repetirse la operación para el llenado del cilindro de menor diámetro.
5. Observe cuidadosamente el agua contenida entre el cilindro externo e interno, si detecta una variación de nivel agregue agua, con el cuidado de no derramar y alterar el contenido en el cilindro interior. Cuide que el nivel permanezca constante en el cilindro exterior.
6. Verifique que durante el llenado no existan indicios de humedad alrededor del IDC, si esto ocurre indicaría una mala colocación de los mismos y deberá cambiar de sitio.
7. Al llenar el cilindro de menor diámetro, cuide que el límite superior del nivel de agua roce la punta del tornillo micrométrico, hasta ver formado un menisco.

Obtención y registro de datos

Consideraciones generales. Antes de realizar el registro de datos de tiempo y lámina infiltrada tome en cuenta las siguientes consideraciones generales:

1. El tornillo micrométrico deberá leerse horizontalmente, es decir, viendo directamente el menisco formado en la punta del tornillo al contacto con el agua. En ese momento deberá registrarse la información leída para un tiempo dado (la unidad de tiempo será minutos).
2. Si se observa humedad alrededor de los dispositivos, debe suspenderse la prueba.
3. Si la velocidad de infiltración es muy lenta deberá usarse carga constante en el IDC, en caso contrario se usará carga variable (Vivar *et al.*, 1993).

4. En condiciones normales después de tres horas de prueba o cuando se observe o detecte que se presentan infiltraciones iguales entre sí, para un tiempo determinado, la prueba deberá detenerse.
5. El registro de la información obtenida se hará en un formato especial.
6. Si no se tiene el formato deberá registrarse de acuerdo a las normas de la extinta Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH, 1978) como a continuación se enlista:
 - a) Tipo de prueba y nombre de la misma.
 - b) Nombre del lugar (geográfico), donde se efectuó el experimento (mapa del lugar o zona).
 - c) Número de la prueba.
 - d) Si no se dispone de mapa de la zona, se auxiliará del material fotográfico del lugar y sitio de prueba.
 - e) Profundidad a la que se infiltró el agua una vez terminada la prueba.
 - f) Características físicas del suelo y condiciones del mismo.
 - g) Vegetación (descripción de la cubierta vegetal de la zona y del sitio de prueba).

Registro y obtención de datos. Una vez llenos los cilindros se iniciará con el registro de datos de la siguiente manera (véase tabla 1): anote en la fila 1 de la columna 1, la hora de inicio de la prueba. La fila 1 y columnas 2 a 6 tendrán el valor 0, porque en ese instante de tiempo no existe ninguna lámina de agua infiltrada. En el instante $t + 1$ (en este ejemplo a las 8:07) en el cual se ejecuta la siguiente medición habrá un intervalo de tiempo de 2 minutos (fila 2, columna 2) entre el inicio de la prueba y la medición actual; el tiempo acumulado es de 2 min (fila 2, columna 3) y una *lectura* de lámina infiltrada de 7.85 cm (fila 2, columna 4). En la fila 2,

columnas 5 y 6, los valores serán 0 porque no existen datos para diferenciar las lecturas. En el tiempo $t + 2$, es decir a las 8:08 (fila 3, columna 1) existe un intervalo de tiempo entre la lectura anterior y la actual de 1 min (fila 3, columna 2) y un tiempo acumulado de 3 min (fila 3, columna 3) que es la suma de los intervalos de tiempo anteriores, y una lectura de lámina infiltrada de 7.712 cm (fila 3, columna 4). La diferencia de lecturas de 0.138 (fila 3, columna 5) es el resultado de la diferencia de los valores de las lecturas de la fila 2 columna 4 menos los valores de la fila 3 columna 4. Finalmente el valor de velocidad de infiltración de 8.28 cm/h (fila 3, columna 6) es el resultado de dividir el valor .138 (fila 3, columna 5) entre 1 (fila 3, columna 2), cuidando convertir las unidades de tiempo de minutos a hora. El resto de la tabla 1 se llena repitiendo los pasos aquí enunciados. De acuerdo a Cerda (1995) el registro de datos se detiene cuando la velocidad de infiltración tiende a ser constante (véanse los valores finales de la columna 6).

Saque el agua sobrante de los cilindros y proceda a quitarlos con el debido cuidado para no alterar el suelo. Si se alteró el suelo la prueba debe repetirse en otro sitio (en la figura 5 se observa el suelo ligeramente alterado). Finalmente, con la cinta métrica se deberá medir la profundidad del suelo mojado (como se observa en la figura 5).

Ejemplo de cálculo

El IDC proporciona datos de velocidad de infiltración del agua en suelos agrícolas, como se muestra en la tabla 1 (columna 6), que luego tienen que ser ajustados en gabinete. Algunos casos como el que aquí se expone presentan curvas exponenciales alineadas en la tendencia. En otros se presentan curvas con *outliers*, es decir, con varios valores atípicos (no alineadas a la tendencia)

que deben someterse a una explicación y en su caso ajustarse posteriormente con una correlación lineal. La ecuación presentada por Kostiakov (Cisneros, 2003) realiza este ajuste y es estadísticamente correcto si la correlación lineal es alta ($r^2 \geq 0.8$). Con la ecuación de Kostiakov, además de ajustar la tendencia, se pueden predecir valores de infiltración (I) para tiempos más largos que el experimentado. A continuación se enuncian las generalidades de la aplicación del método de ajuste basada en la ecuación de Kostiakov:

1. Los valores obtenidos en campo con el IDC se presentan en forma ordenada (véanse tablas 1 y 2).
2. De la ecuación de Kostiakov (Guevara *et al.*, 2012):

$$I = kt^{-n} \quad (4.1)$$

Donde:

I = Velocidad de infiltración (cm/h)

k = Valor constante de acuerdo al tipo de suelo

n = Valor constante de acuerdo al tipo de suelo

t = Tiempo transcurrido (min)

3. Se obtienen logaritmos de la ecuación 4.1

$$\log I = \log k + n \log t \quad (4.2)$$

4. Posteriormente se determinan los valores de las incógnitas: k y n de la ecuación 4.1.
5. Una vez obtenidos k y n se calcula la velocidad de infiltración (I) con la ecuación 4.1.
6. Se ejecuta la correlación lineal simple entre los valores calculados de infiltración con la ecuación 4.1 y los obtenidos en los registros de las pruebas de campo.

A continuación se ejemplifica el cálculo de “I” con los datos de la tabla 1, obtenidas de una prueba de infiltración con el método del IDC.

Datos de campo. En la tabla 1 se pueden ver los valores de campo obtenidos en una prueba con carga variable.

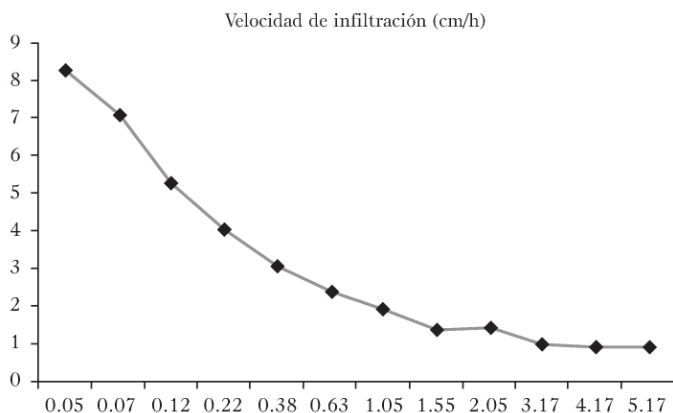
TABLA 1
DATOS DE CAMPO DEL INFILTRÓMETRO DE DOBLE CILINDRO

<i>Tiempo (hora-min) (1)</i>	<i>Intervalos (2)</i>	<i>Tiempo acumulado (l, min) (3)</i>	<i>Lectura (cm) (4)</i>	<i>Diferencias en lecturas (cm) (5)</i>	<i>Infiltración (I) (cm/h) (6)</i>
08:05	0	0	0	0	0
08:07	2	2	7.85	0	0
08:08	1	3	7.712	0.138	8.28
08:09	1	4	7.594	0.118	7.08
08:12	3	7	7.331	0.263	5.26
08:18	6	13	6.929	0.402	4.02
08:28	10	23	6.42	0.509	3.054
08:43	15	38	5.827	0.593	2.384
<i>Segunda lectura</i>					
08:48	5	0	7.892	0	0
09:08	20	63	7.259	0.633	1.899
09:38	30	93	6.582	0.677	1.354
10:08	30	123	5.874	0.708	1.416
<i>Tercera lectura</i>					
10:15	7	0	8.146	0	0
11:15	60	190	7.185	0.961	0.961
12:15	60	250	6.285	0.9	0.9
13:15	60	310	5.386	0.899	0.899

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 6 se muestra la curva de infiltración obtenida en las pruebas de campo con el IDC con carga variable (columnas 3 vs. 6), donde el eje y representa la velocidad de infiltración I en cm/h y el eje x el tiempo en horas.

FIGURA 6
CURVA DE INFILTRACIÓN



Fuente: Elaboración propia.

En la figura se puede apreciar una función exponencial descendente, con algunos datos que tienen una tendencia no alineada entre los tiempos 1.05 y 4.17. Para quitar esas tendencias no alineadas y predecir valores de velocidad de infiltración, Kostiakov planteó realizar una regresión lineal sobre los datos de la figura 6, con base en la ecuación 4.1, como a continuación se ejemplifica.

Presentación ordenada de I (cm/h) obtenidos en campo y cálculo de logaritmos. Se extraen de la tabla 1 las columnas 6 y 3 y se calculan sus logaritmos (véase tabla 2).

TABLA 2
VALORES DE INFILTRACIÓN Y CÁLCULO DE LOGARITMOS

<i>Infiltración (I)</i> (cm/h)	<i>Tiempo (t)</i> (min)	<i>Log I</i>	<i>Log t</i>
8.28	3	0.91803	0.47712
7.08	4	0.85003	0.60206
5.26	7	0.72099	0.8451
4.02	13	0.60423	1.11394
3.054	23	0.48487	1.36173
2.384	38	0.37730	1.57978
		$\Sigma 3.95545$	$\Sigma 5.97973$
1.899	63	0.27852	1.79934
1.354	93	0.13162	1.96848
1.416	123	0.15106	2.08991
0.961	190	-0.01728	2.27875
0.9	250	-0.04576	2.39794
0.899	310	-0.04624	2.49136
		$\Sigma 0.45192$	$\Sigma 13.02578$

Fuente: Elaboración propia.

Estimación de las constantes k y n. La tabla 2 se dividió en dos grupos de datos, de donde se obtuvieron dos ecuaciones:

$$3.95545 = 6 \log K + n (5.97973) \quad (4.3)$$

$$0.45192 = 6 \log K + n (13.02578) \quad (4.4)$$

Restando la ecuación 4.4 de 4.3:

$$3.50352 = 0 - n (7.04605) \quad (4.5)$$

Despejando n de ecuación 4.5:

$$n = (-3.50352)/7.04605 \quad (4.6)$$

$$n = -0.497 \quad (4.7)$$

Sustituyendo 4.7 en 4.3 se tiene:

$$3.95545 = 6\log k + (-0.497)(5.97973) \quad (4.8)$$

Despejando k :

$$\log k = 6.92738/6 \quad (4.9)$$

Por lo tanto, sabiendo que $\log k = 10^K$, entonces:

$$k = 14.27$$

La ecuación que calcula los valores de infiltración queda como:

$$I = 14.27t^{-0.497} \quad (4.10)$$

Con esta ecuación se calcula la velocidad de infiltración (I) que se muestra en la tabla 3.

Correlación de valores de infiltración: calculados vs. datos de campo.

Se sugiere estimar el coeficiente de correlación de los datos del IDC medidos en campo y los resultados obtenidos de forma matemática con la ecuación 4.10. Así, se reescriben las columnas 2 y 3 de la tabla 3, luego se obtienen los cuadrados y su producto simple (véase tabla 4).

TABLA 3
 VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN DE CAMPO VS. CALCULADA

<i>t (min)</i> (1)	<i>I en campo (cm/h)</i> (2)	<i>I calculada (cm/h)</i> (3)
3	8.28	8.27
4	7.08	7.16
7	5.26	5.43
13	4.02	3.99
23	3.054	3.00
38	2.384	2.34
63	1.899	1.82
93	1.354	1.50
123	1.416	1.31
190	0.961	1.05
250	0.9	0.92
310	0.899	0.82
$\Sigma 1,117$	$\Sigma 37.51$	$\Sigma 37.61$

Fuente: Elaboración propia.

TABLA 4
 PROCESO DE CÁLCULO ESTADÍSTICO

<i>X</i> (1)	<i>Y</i> (2)	<i>X</i> ² (3)	<i>Y</i> ² (4)	<i>XY</i> (5)
8.28	8.27	68.56	68.39	68.48
7.08	7.16	50.13	51.27	50.69
5.26	5.43	27.67	29.48	28.56
4.02	3.99	16.16	15.91	16.04
3.054	3.00	9.33	9.00	9.162
2.384	2.34	5.68	5.48	5.58
1.899	1.82	3.61	3.31	3.46
1.354	1.50	1.83	2.25	2.03
1.416	1.31	2.01	1.72	1.85
0.961	1.05	0.92	1.10	1.01
0.900	0.92	0.81	0.85	0.83
0.899	0.82	0.808	0.67	0.74
$\Sigma 37.507$	$\Sigma 37.61$	$\Sigma 187.52$	$\Sigma 189.44$	$\Sigma 188.43$

Fuente: Elaboración propia.

$$\sum x^2 = 187.52 - (37.51^2/12) = 70.27$$

$$\sum y^2 = 189.44 - (37.61^2/12) = 71.56$$

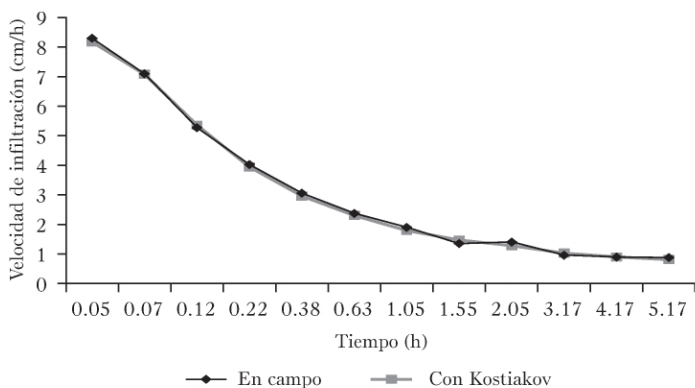
$$\sum xy = 188.43 - ((37.51)(37.61)/12) = 70.87$$

$$r^2 = \frac{\sum xy}{((\sum x^2)(\sum y^2))^{1/2}}$$

$$r^2 = \frac{70.87}{((70.27)(71.56))^{1/2}} = 0.9995$$

La r^2 es muy alta como se aprecia en la figura 7.

FIGURA 7
COMPARACIÓN DE VELOCIDADES DE INFILTRACIÓN



Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, para disponer de un criterio que permita conocer la rapidez o lentitud de la tasa de infiltración estimada, en la tabla 5 se muestran algunos datos indicativos.

TABLA 5
 VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN EN SUELOS

Clasificación	Magnitud (cm/h)	Características
Muy lenta	<0.25	Suelos con un alto contenido de arcilla.
Lenta	0.25-1.75	Suelos con alto contenido de arcilla, bajo en materia orgánica o suelos delgados.
Media	1.75-2.50	Suelos migajones arenosos o migajones limosos
Rápida	>2.50	Suelos arenosos o migajones limosos profundos y de buena agregación.

Fuente: Cisneros, 2003.

Cálculo del volumen de agua mínimo para el IDC. Si la prueba se realiza una sola vez, hasta que la carga hidráulica en los cilindros se haga cero, el volumen *mínimo* de agua consumido será el volumen contenido en los cilindros, por lo tanto:

$$V = (A)(h) \quad (4.11)$$

Donde:

V = Volumen de agua (l)

A = Área del cilindro mayor (m^2)

h = Altura del cilindro mayor (m)

Por lo que:

$$V = (3.1416)(0.30^2 \text{ m}^2)(0.30 \text{ m}) = 0.0848 \text{ m}^3 \quad (4.12)$$

Es decir el volumen mínimo necesario para llenar ambos cilindros es de 84.80 l. Sin embargo, al reponer el agua en los cilindros durante el proceso de prueba, el agua consumida e infiltrada en el suelo es mayor, por lo que se sugiere disponer de un volumen mayor antes de ejecutar la prueba.

Infiltración acumulada (F). Si se desea saber la cantidad de infiltración acumulada en cm entonces se debe integrar la ecuación 4.1 entre el tiempo “0” y un tiempo “t” determinado. Por lo tanto:

$$\int_0^t I dt = \int_0^t k t^{-n} = \frac{k t^{-n+1}}{-n+1} \quad (4.13)$$

Sustituyendo valores en 4.13 se obtienen los resultados de la tabla 6:

TABLA 6
INFILTRACIÓN ACUMULADA F

<i>t (min)</i> (1)	<i>F (cm)</i> (2)
3	6.29
4	7.27
7	9.63
13	13.14
23	17.51
38	22.55
63	29.07
93	35.37
123	40.71
190	50.66
250	58.16
310	64.80

Fuente: Elaboración propia.

Tasa de cambio instantáneo de la velocidad de infiltración. La tasa de cambio instantáneo de la velocidad de infiltración se obtiene derivando la ecuación 4.1:

$$\frac{d}{dt} I = k \frac{d}{dt} t^{-n} \quad (4.14)$$

$$\frac{d}{dt} I = (k)(-n)t^{-n-1} \quad (4.15)$$

Sustituyendo valores:

$$\frac{d}{dt} I = (14.27)(-(-0.497))t^{-(-0.497-1)} \quad (4.16)$$

$$\frac{d}{dt} I = 6.9696t^{-0.595} \quad (4.17)$$

SIMULADORES DE LLUVIA

Un simulador de lluvia (SL) está constituido por una serie de aspersores hidráulicos y dispositivos de medición de caudal, así como de pluviómetros para cuantificar las alturas de precipitación. Con estos elementos se pueden realizar balances de agua en una superficie entre 1 y 40 m², con el fin de cuantificar variables como cantidad de lluvia ocurrida, escurrimiento y tasa de infiltración, utilizando un modelo físico con el cual se simula la lluvia de forma controlada. El SL se fundamenta en la ecuación de conservación de masa en su versión volumétrica:

$$\Delta V = V_e - V_s \quad (4.18)$$

Donde:

ΔV = Cambio de volumen en el área experimental (m³)

V_e = Volumen de entrada al área experimental (m³)

V_s = Volumen de salida del área experimental (m³)

Puesta en términos hidrológicos la ecuación 4.18 se puede reescribir del siguiente modo:

$$B_h = P - (E + Ev + F) \quad (4.19)$$

Donde:

B_h = Balance de agua (mm)

P = Precipitación total (mm)

E = Escorrimento (mm)

E_v = Evaporación (mm)

F = Infiltración (mm)

Así, en el SL se puede estimar de forma directa las variables P , E y de forma indirecta E_v y F . Aunque en ocasiones se puede medir de forma directa E_v , sin embargo si el evento es muy corto y las condiciones lo ameritan E_v se puede despreciar.

El SL tiene la ventaja de distribuir uniformemente el agua mediante una regadera o sistema de aspersión sobre el área experimental, que puede ser como ya se enunció de hasta 40 m². El SL intenta reproducir, lo mejor posible, la forma natural de una lluvia.

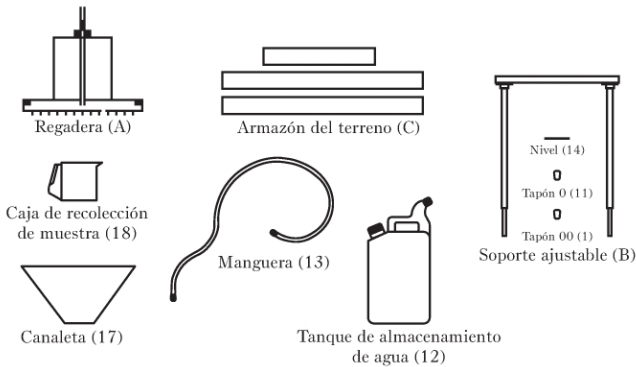
De acuerdo a algunos autores este método es más recomendable que el IDC porque la superficie de experimentación es mucho mayor, evita los problemas de alteración física del suelo, el movimiento del agua no está limitado por las fronteras de los cilindros y no se tiene el problema del movimiento horizontal del agua. De acuerdo a Benito *et al.* (2001) y Weber *et al.* (2009) su principal limitación es replicar las características de una lluvia natural, mientras que otros autores afirman que el hecho de distribuir el agua mediante regaderas con la presión hidráulica conveniente para representar el fenómeno de impacto (colmatación) del agua en el suelo, simula en forma bastante aceptable la precipitación pluvial.

Equipo

De acuerdo con Monge *et al.* (2008) los elementos básicos de un SL son los que se muestran en la figura 8. En dicha figura no se

exponen todos los elementos del SL, pero se enlistan más adelante aquellos que son absolutamente imprescindibles para cuantificar la precipitación (P), el escurrimiento (E) y las variables necesarias para que se pueda estimar la capacidad de infiltración del suelo bajo estudio.

FIGURA 8
ELEMENTOS DE UN SIMULADOR DE LLUVIA



Fuente: Monge *et al.*, 2008.

A continuación se enuncian los dispositivos que constituyen el simulador de lluvia y algunos elementos para la medición del tiempo y niveles de agua (tirantes).

1. Dispositivo o regadera (A), también denominado simulador de lluvia. Su tamaño se adecua a los objetivos del experimento. Se sugiere cubrir un área entre 1 y 40 m².
2. Pluviómetros (18). Su número depende del área experimental y del sistema de aspersión. Se colocan los pluviómetros necesarios para medir P con el objetivo de cuantificar correctamente la lluvia.

3. Armazón del terreno (C) y soporte ajustable (B). Se utiliza para colocar los aspersores (regaderas) sobre la superficie experimental.
4. Tanque de almacenamiento (12). Es un recipiente del tamaño necesario para suministrar agua al SL.
5. Aforador (17). Es un dispositivo para medir escorrentía (17). Por ejemplo, un aforador de garganta larga como el descrito en Martínez *et al.* (1994) y Mundo (2013).
6. Manguera (13). Son tubos flexibles de diámetro pequeño para conectar el tanque de almacenamiento con la red de tuberías de las regaderas.
7. Un cronómetro.
8. Un limnómetro.

Instalación

Se escoge un área representativa de la serie de suelo a estudiar; la superficie debe estar ubicada lejos de tomas de agua, caminos transitables, canales de riego y en general de zonas húmedas o zonas de nivel freático alto. La pendiente del área de prueba deberá ser lo más parecida a la pendiente de la parcela agrícola que se requiere representar. Si la zona de prueba lo permite y se dispone de una regadera para tal efecto, el área experimental se sugiere de 40 m².

Con respecto a la instalación de los pluviómetros se deberán distribuir de manera uniforme, por ejemplo, para una superficie de 1 m² se sugiere un pluviómetro. Éste se ubicará donde se colecte bien la lluvia simulada con el fin de medir correctamente la altura de precipitación representativa del evento. Para una superficie de 40 m² se sugiere utilizar como mínimo 10 pluviómetros y un máximo de 40. El medidor de escorrentía o aforador se colocará al final del área de prueba, de tal forma que mida el escurrimiento directo total de la superficie experimental.

Aplicación de agua

El agua utilizada para la prueba será la que se usa normalmente en las labores de riego y se aplicará mediante un sistema de riego tipo aspersión. Una vez calibrado el simulador de lluvia éste deberá distribuir la precipitación de manera uniforme sobre el área experimental. Para comprobar la uniformidad se verificará que la altura de lluvia recibida en cada pluviómetro sea la misma. De forma teórica dicha uniformidad se puede estimar con la ecuación de Christiansen (Tornés *et al.*, 2013):

$$CU = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})}{n\bar{x}} \right] 100 \quad (4.20)$$

CU = Coeficiente de uniformidad

\bar{x} = Media aritmética de los volúmenes recogidos.

x_i = Volúmenes recogidos en cada pluviómetro.

n = Número de pluviómetros.

La intensidad de lluvia deberá ser constante, con el fin de obtener escurrimientos también cuasi constantes. Este procedimiento de aplicación de intensidad de lluvia constante se consigue únicamente con las regaderas calibradas. Se debe garantizar que el gasto de salida en todas las boquillas sea el mismo.

Obtención y registro de datos

La obtención y registro de datos se describirá con detalle en el “ejemplo de cálculo”. En este apartado se enuncian dos consideraciones relevantes antes de iniciar las pruebas experimentales y se describe la ecuación para estimar la escorrentía o caudal (Q) con un aforador colocado al final de la superficie experimen-

tal, así como la forma de transformar Q a Q_v , para construir el hidrograma de salida de cada experimento.

Antes de iniciar con la prueba debe asegurarse que:

1. El simulador de lluvia esté calibrado.
2. La intensidad de lluvia sea constante, asociado al periodo de retorno determinado en los objetivos del estudio.

Para registrar los datos de forma adecuada, se seguirán las siguientes instrucciones:

1. Se deberá medir con precisión la escorrentía o caudal (Q) con un aforador de garganta larga (AGL) en unidades de cm^3/min (Martínez *et al.*, 1994). En caso de no contar con un AGL se puede usar un aforador Parshall, aforador Cipolletti o aforador de pared delgada (Mundo, 2013). Si se usa un AGL se debe colocar el limnómetro a una distancia $L = 4h$ aguas arriba de la sección contraída del AGL para medir el tirante hidráulico (h) y con ello calcular el caudal escurrido en la superficie experimental. El caudal se estima con una ecuación del tipo:

$$Q = Ch^x \quad (4.21)$$

Donde:

Q = Caudal o escurrimiento (cm^3/min)

C = Constante de la función (adimensional)

h = Tirante hidráulico (cm)

x = Constante de la función (adimensional)

Si no se dispone de un limnómetro se puede usar una escala graduada en la pared rectangular del AGL, a una distancia $L = 4h$

aguas arriba de la sección contraída, con el fin de medir el tirante hidráulico (h). Después de medir el caudal Q en cm^3/min , conviene convertir “ Q ” a escurrimiento “ Q_v ” en unidades de velocidad (cm/h) usando la ecuación de conservación de masa en su versión cinética:

$$Q = (Q_v)(A) \quad (4.22)$$

Donde:

Q = Caudal (cm^3/min)

Q_v = Tasa de lluvia en unidades de velocidad (cm/h)

A = Área hidráulica (cm^2)

Igualando 4.21 y 4.22 y despejado Q_v , para el AGL de sección crítica rectangular se tiene que:

$$Q_v = \frac{Ch^x}{A} \quad (4.23)$$

Donde, A es el área hidráulica del aforador en metros cuadrados, antes de su sección crítica, a una distancia $L = 4h$ (hacia aguas arriba).

2. Registrar las lecturas de altura de lluvia acumulada en cm en los pluviómetros, para los distintos incrementos de tiempo.
3. Los pasos 1 y 2 deberán registrarse para cada evento de lluvia en la tabla 7 como se muestra en el ejemplo de cálculo, que se describe a continuación.

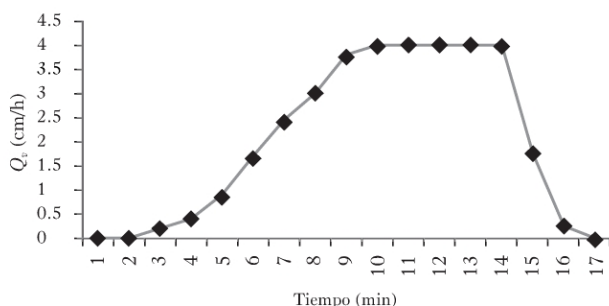
Ejemplo de cálculo

Suponga que se realiza una prueba de velocidad de infiltración en un suelo agrícola con un SL de 1 m^2 de superficie, cuyos resultados se muestran en la tabla 7. En la literatura sobre el tema, las varia-

bles que se enuncian a continuación y que se muestran en la tabla 7 se denotan como sigue: tiempo en minutos (t), tasa de lluvia o tasa de precipitación en cm/h (Q_v), incremento del volumen de escurrimiento en cm/h (ΔV), volumen de escurrimiento acumulado en cm/h (Va), detención del flujo en cm/h (D), lluvia en exceso en cm/h (Pe), altura de lluvia en cm/h (P), cantidad de agua infiltrada en cm/h (P_i), cantidad de agua infiltrada desfasada en t en cm/h (P_{id}), incremento del volumen de infiltración en cm/h (ΔF), capacidad de infiltración en cm/h (F). La variable D es la parte del escurrimiento medida después del fin de la lluvia, por eso se denomina en algunos documentos monográficos “detención superficial recuperable” o “detención del flujo”.

Así, en la columna 1 de la tabla 7 se muestra el tiempo de prueba (t) que fue de 160 min. En la columna 2 se muestran los incrementos de tiempo en minutos. La columna 3 es la tasa de precipitación (Q_v) en cm/h generada por el SL (véase figura 9).

FIGURA 9
TASA DE PRECIPITACIÓN DEL SIMULADOR DE LLUVIA



Fuente: Elaboración propia.

La tasa de lluvia o precipitación (Q_v) representa el “hidrograma de salida” del área experimental en unidades de veloci-

dad; la variable Q_v se obtiene midiendo con un limnómetro el tirante h (cm) en el aforador, en distintos instantes de tiempo (min). Los valores de h se sustituyen en la ecuación 4.23. Luego se elabora el hidrograma mostrado en la figura 9, utilizando los valores de las columnas 1 y 2 de la tabla 7 (también se puede usar la ecuación 4.24 para estimar Q_v). Como se puede ver en la figura 9 y tabla 7 en el instante $t = 0$ el valor de " Q_v " es necesariamente cero porque " h " vale cero. En el instante $t = 5$ min el valor $Q_v = 0$ significa que el escurrimiento aún no ha alcanzado la salida del sistema donde se ubica el aforador de caudales. A los 10 min de prueba el escurrimiento alcanza el aforador de garganta larga a la salida del sistema experimental, por lo tanto para el valor h medido en el aforador, el valor correspondiente es $Q_v = 0.1$ cm/h.

En la columna 4 de la tabla 7, se denota como ΔV al incremento del volumen de escurrimiento en unidades de velocidad (cm/h). Se estima ΔV con la ecuación 4.24 (véase figura 10):

$$\Delta V = \frac{(Q_v)(\Delta t)}{60} \quad (4.24)$$

Donde:

Q_v = Tasa de precipitación (cm/h)

Δt = Incrementos de tiempo (min)

La columna 5 de la tabla 7 es el volumen de escurrimiento acumulado (V_a) en cm/h, se obtiene sumando cada valor de dicha columna el valor de la columna 4, en $t + 1$.

La columna 6 de la tabla 7, detención de flujo (D) en cm/h, se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$D = \left[\frac{Q_{vc}}{F_c} \right] Q_{vi} \quad (4.25)$$

Donde:

Q_{vi} = Tasa de precipitación en el instante i (cm/h)

F_c = Infiltración constante (cm/h)

Q_{vc} = Tasa de precipitación constante (cm/h)

Debido a que el valor de F_c se desconoce en esta etapa del experimento se puede tomar el valor constante de la curva de la figura 9 sin errores apreciables, por lo tanto para el caso aquí presentado F_c es igual a 4 y el valor asociado Q_{vc} es igual a 0.6667 cm/h (véanse tabla 7 y figura 10).

La ecuación 4.25 representa el escurrimiento cuando la lluvia artificial se ha detenido, por lo tanto es la curva de recesión en la figura 9, que forma parte del escurrimiento directo pero sin lluvia.

La columna 7, lluvia en exceso (Pe) en cm/h, se obtiene sumando el volumen de escurrimiento acumulado, Va , y la detención del flujo, D , columnas 5 y 6.

Los datos de la columna 8, altura de lluvia (P) en cm/h, son valores de las lecturas del pluviómetro enunciados en el apartado “Obtención y registro de datos” para los distintos tiempos t .

Los valores de la columna 9, que representan la cantidad de agua infiltrada, Pi , en cm/h, se obtienen sustrayendo los valores de la columna 8 de la 7, es decir, la diferencia de la altura de lluvia y de la lluvia en exceso ($P-Pe$), la cual se explica mediante el siguiente razonamiento: si se desprecia la evaporación, la lluvia total sobre la pequeña superficie experimental de 1 m², es decir, la precipitación total (P) es la suma de la lluvia que escurre (Pe) más la lluvia que se infiltra (Pi). Representadas en una ecuación de balance se puede escribir del siguiente modo:

$$P = Pe + Pi \quad (4.26)$$

TABLA 7
 VARIABLES Y VALORES DEL SIMULADOR DE LLUVIA

t (min) 1	Δt (min) 2	Q_v (cm/h) 3	ΔV (cm/h) 4	V_a (cm/h) 5	D (cm/h) 6	P_e (cm/h) 7	P (cm/h) 8	P_i (cm/h) 9	P_{id} (cm/h) 10	ΔF (cm/h) 11	F (cm/h) 12
0	0	0	0.0000	0.0000	0.00000	0.00000	0	0.0000	0.0000	0.0000	
5	5	0	0.0000	0.0000	0.00000	0.00000	0	0.0000	0.0000	0.0000	
10	5	0.1	0.0083	0.0083	0.01667	0.02500	0.8	0.7917	0.0000	0.7917	9.50
20	10	0.4	0.0667	0.0750	0.06667	0.14167	1.7	1.5583	0.7917	0.7667	4.60
30	10	0.9	0.1500	0.2250	0.15001	0.37501	2.5	2.1250	1.5583	0.5667	3.40
40	10	1.7	0.2833	0.5083	0.28335	0.79168	3.3	2.5083	2.1250	0.3833	2.30
50	10	2.45	0.4083	0.9167	0.40835	1.32502	4.2	2.8750	2.5083	0.3667	2.20
60	10	3	0.5000	1.4167	0.50003	1.91669	5	3.0833	2.8750	0.2083	1.25
70	10	3.5	0.5833	2.0000	0.58336	2.58336	5.8	3.2166	3.0833	0.1333	0.80
80	10	3.8	0.6333	2.6333	0.63337	3.26670	6.7	3.4333	3.2166	0.2167	1.30
90	10	4	0.6667	3.3000	0.66670	3.96670	7.5	3.5333	3.4333	0.1000	0.60
100	10	4	0.6667	3.9667	0.66670	4.63337	8.3	3.6666	3.5333	0.1333	0.80
110	10	4	0.6667	4.6333	0.66670	5.30003	9.2	3.9000	3.6666	0.2333	1.40
120	10	4	0.6667	5.3000	0.66670	5.96670	10	4.0333	3.9000	0.1333	0.80
130	10	4	0.6667	5.9667	0.66670	6.63337	0		4.0333		
140	10	1.75	0.2917	6.2583	0.29168	6.55001	0				
150	10	0.25	0.0417	6.3000	0.04167	6.34167	0				
160	10	0	0.0000	6.3000	0.00000	6.30000	0				

Fuente: Elaboración propia.

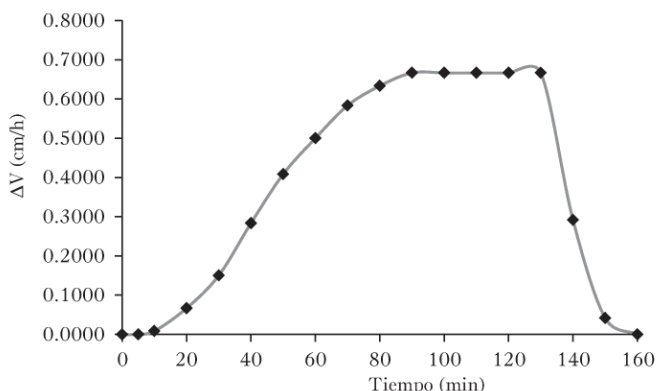
Por lo tanto, la lluvia que se infiltra (P_i) es:

$$P_i = P - P_e \quad (4.27)$$

Los valores de la columna 10, representan la cantidad de agua infiltrada desfasada en t . Se obtienen desfasando en $t + 1$ los valores de la precipitación infiltrada P_i de la columna 9.

La columna 11 denotada como ΔF en cm/h es el incremento de la P_i en $t + 1$. Por lo tanto ΔF se obtiene restando los valores de la columna 9 menos los valores de la columna 10.

FIGURA 10
VOLUMEN DE ESCURRIMIENTO



Fuente: Elaboración propia.

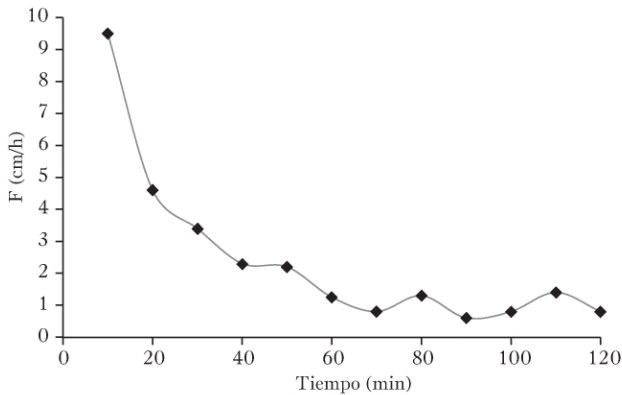
La columna 12 es la tasa de infiltración en cm/h, se obtiene con la siguiente ecuación (véase figura 11):

$$F = \frac{(\Delta F)}{(\Delta t)} (60) \quad (4.28)$$

La figura 11 muestra los datos de velocidad de infiltración obtenidos con el si en campo. Es evidente que el valor de 1.30 cm/h en

$t = 80$ min no puede ser mayor a 0.80 cm/h en $t = 70$ min. De igual modo 0.80 cm/h en $t = 100$ min no debe ser mayor a 0.60 cm/h en $t = 90$ min y 1.40 cm/h en $t = 110$ min no debe ser mayor que sus precedentes; estos valores parecen ser errores de las pruebas de campo, es decir, datos atípicos (no alineados a la tendencia), como ya se ha enunciado deben someterse a una explicación y en su caso ajustarse posteriormente con una correlación como se describió en el apartado “Ejemplo de cálculo” del IDC en el método de Kostiakov.

FIGURA 11
VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN



Fuente: Elaboración propia.

MINIINFILTRÓMETRO

De acuerdo con Perroux *et al.* (1988) el miniinfiltrómetro (MI) o infiltrómetro de minidisco es un instrumento de campo ampliamente utilizado para medir, en condiciones próximas a saturación, las propiedades hidráulicas del suelo tales como la conductividad

hidráulica (K), la sortividad (S) o el número, tamaño de macro y mesoporos del suelo que son los conductores de agua (Moret *et al.*, 2007). Por otro lado Aoki *et al.* (2005) y Amancha (2015) afirman que el MI puede medir la velocidad de infiltración del agua no sólo en suelos cercanos a la saturación sino también en suelos saturados.

La rapidez para realizar las pruebas de infiltración, la facilidad para instalar y operar el MI hacen que su uso se haya generalizado en numerosos estudios de hidrología, agronomía y ciencias del suelo (Moret *et al.*, 2009). El MI, generalmente fabricado en metacrilato (véase figura 12), consta de una base o disco sobre la que se inserta un tubo dividido en dos compartimentos: un depósito de agua y una cámara de burbujas (Perroux *et al.*, 1988), que se coloca en el suelo sin alterarlo. El MI es una técnica no destructiva porque no modifica la estructura, la porosidad o estado de compactación del suelo, realizando las mediciones de infiltración de forma activa, ya que el flujo no confinado en estado cuasi permanente es alcanzado rápidamente (Aoki *et al.*, 2005) en la intrincada red de poros del mismo. Así, de acuerdo con Taboada *et al.* (1998) la infiltración del agua en un suelo no saturado en condiciones de flujo permanente refleja las características de dicha red.

Para medir la velocidad de infiltración o identificar a través de las pruebas experimentales la contribución relativa de algunos de los parámetros hidrodinámicos fundamentales de los que depende el caudal de agua infiltrada, es necesario calibrar el MI antes de que se inicie el experimento, estableciendo el nivel de presión durante su llenado, es decir, determinar la *fuerza de succión* en la cámara de burbujas (Aoki *et al.*, 2005).

A pesar de que las velocidades de infiltración medidos con el MI son puntuales, como las que realiza el IDC, la diferencia

entre ellos es que el MI no altera el perfil vertical del suelo, porque el equipo se coloca sobre la superficie del terreno. De acuerdo con Decagon (2016) y Amancha (2015) el MI puede medir la velocidad de infiltración en diversos tipos de suelos y texturas. Al igual que el IDC se recomienda que el MI se use en parcelas donde el método de riego es *inundación total* (cuadros, bordos a nivel o melgas). Por otro lado, las sugerencias para seleccionar los sitios de prueba con el MI son las mismas que el IDC (véase el apartado “Infiltrómetro de doble cilindro”).

Equipo

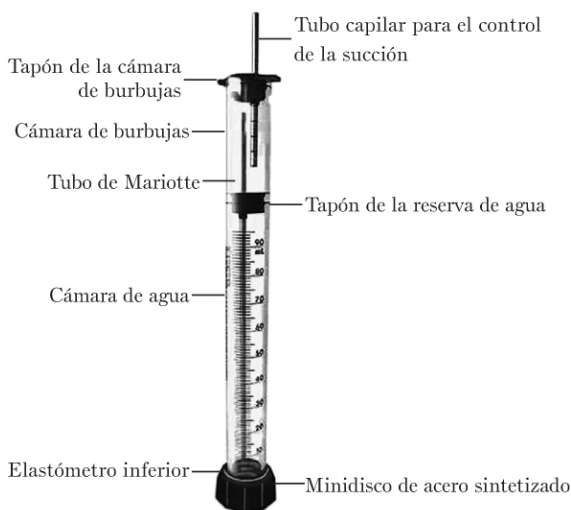
El equipo necesario para realizar las pruebas de infiltración con este método son los siguientes:

1. Recipiente pequeño para transportar agua. Con una botella de un litro se pueden realizar más de tres pruebas en un suelo arenoso y más de 10 en un suelo migajón arenoso.
2. Cronómetro.
3. Libreta de campo y lápiz.
4. Anillo de plástico de 2 mm de grosor de igual diámetro que la base del MI.
5. Arena con partículas de 0.5 mm de diámetro (500 gramos es suficiente para realizar más de una decena de pruebas).
6. Miniinfiltrómetro como el que se describe a continuación y se muestra en la figura 12.

El MI es un dispositivo pequeño, tiene una longitud de 32.7 cm y 3.1 cm de diámetro. Posee un disco sintético de acero inoxidable (minidisco) con un diámetro de 4.5 cm y 3 mm de espesor. Como se puede ver en la figura 12 posee un tubo de control

de succión que tiene una longitud de 10.2 cm (el rango de succiones varía entre 0.5 y 7 cm). El MI tiene dos depósitos: el de burbujas y la cámara de agua. Ambos depósitos están separados por una tapa de goma (tapón de reserva de agua). La cámara de agua está graduada en centímetros y contiene el agua que se va a aplicar en la prueba. La longitud de esta cámara es de 21.2 cm y su volumen de 135 ml. La cámara de burbujas controla la succión que el MI realiza sobre la superficie de contacto entre el disco y el suelo, su función principal es crear una succión constante entre ambas superficies. El MI tiene un tubo de Mariotte que conecta ambas cámaras (Amancha, 2015).

FIGURA 12
COMPONENTES DEL MINIINFILTRÓMETRO



Fuente: Decagon, 2016.

Las principales ventajas del MI sobre el IDC y el SL son las siguientes: 1. El MI utiliza poca agua para su funcionamiento, 2. El agua se puede transportar en un recipiente pequeño (la capacidad de la cámara es de aproximadamente 14 por ciento respecto a un recipiente de un litro), 3. Se pueden realizar varias pruebas en diferentes puntos de interés, 4. El peso es despreciable respecto al IDC y el SL, 5. La instalación y puesta en operación es mucho más sencilla que el IDC y el SL.

Instalación

Antes de instalar el MI se debe localizar el sitio de muestreo, éste debe ser representativo de la superficie de suelo que se pretende evaluar. Al igual que el IDC cuando se instala el MI se debe evitar: suelos agrietados, zonas con manto freático cercano a la superficie del suelo, madrigueras de hormigas, madrigueras de topes, suelos compactados por el tránsito de personas, maquinaria agrícola o animales. Debido a la facilidad para ejecutar los ensayos de velocidad de infiltración se sugiere realizar varias pruebas en sitios distintos de la zona, distribuyéndolas espacialmente de manera adecuada con el fin de representar a la superficie bajo estudio como se indica en el apartado “Infiltrómetro de doble cilindro”.

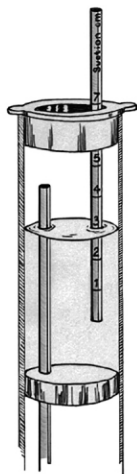
El MI se instala del siguiente modo (Decagon, 2016):

1. Se quita el tapón de la cámara de burbujas (la goma de la parte superior del MI). Luego utilizando una botella con un litro de agua corriente se llena la cámara de burbujas hasta $\frac{3}{4}$ de su capacidad máxima. Si no desea quitar la goma superior del MI ponga agua a través del *tubo capilar para el*

control de la succión. No debe usarse agua destilada porque el agua del suelo tiene solutos, las arcillas tienen sales y el agua destilada puede cambiar el equilibrio iónico y flocular o dispersar las partículas del suelo.

2. Una vez que la cámara de burbuja tenga agua y antes de poner en posición invertida el MI, se debe deslizar el *tubo de control de succión* hacia abajo tapando con un dedo dicho tubo para evitar la salida de agua. Después de invertirlo se debe retirar el elastómetro inferior con el disco poroso, luego se llena la cámara de agua. Después se debe colocar el elastómetro inferior con el disco poroso, asegurándose de que no haya fugas.
3. Colocar nuevamente en posición vertical el MI.
4. Si el tubo de Mariotte emite burbujas se debe ajustar la distancia de éste respecto al disco poroso para asegurar una succión cero (debe asegurarse que el extremo del tubo de Mariotte esté a 6 mm del fondo de la cámara de agua).
5. Ajuste nuevamente *el tubo capilar para el control de la succión* según el tipo de suelo donde se ejecuta el experimento. En general, para varios tipos de suelos se recomienda una fuerza de succión de 2 cm. Para suelo arenosos se sugiere 6 cm y para suelos arcillosos o arcillo-limosos se recomienda 0.5 cm (véase figura 13).
6. Colóquese el anillo de plástico de 2 mm de grosor sobre la superficie del suelo.
7. Al interior del diámetro del anillo de plástico se debe colocar una capa delgada de arena. La capa debe tener 1 o 2 mm de espesor. Esta capa tiene el objetivo de lograr un buen contacto hidráulico entre el MI y el suelo bajo estudio.
8. Se coloca el MI dentro del anillo de plástico.
9. Se inician las mediciones y el proceso de registro de datos.

FIGURA 13
AJUSTE DEL TUBO CAPILAR PARA EL CONTROL DE LA SUCCIÓN



Fuente: Decagon, 2016.

Registro y obtención de datos

Se deben registrar los siguientes datos:

1. Fecha, hora, tipo y nombre del experimento.
2. Nombre del lugar donde se efectuó. Se recomienda utilizar un mapa del lugar o zona. Si no se dispone de mapa de la zona, se auxiliará con material fotográfico del lugar.
3. Número de la prueba.
4. Características físicas del suelo y condiciones del mismo.
5. Vegetación (descripción de la cubierta vegetal de la zona y características generales destacables del sitio).

Una vez registrados dichos datos se procede a ejecutar el experimento. Se coloca el MI sobre la superficie del suelo. Compruebe

que haya un buen contacto con dicha superficie, con el fin de que el agua de la cámara inferior fluya hacia éste y se infiltre con una fuerza de succión igual a la que se produce en el interior del MI. Es recomendable registrar el volumen a intervalos de tiempo regulares a medida que el agua se infiltra. El intervalo de tiempo se elige con base en la tasa de succión seleccionada y el tipo de suelo.

Se comienza con la obtención de datos apuntando en una hoja *ex profeso* como la que se muestra en la tabla 8. Debe anotarse en la segunda fila de la tabla 8 los cuatro primeros valores que se explican a continuación: se inicia en el tiempo t (s) cero (fila 1, columna 1), por lo tanto la raíz de t será cero (fila 1, columna 2). El volumen V (ml) de la fila 1 y columna 3 será el contenido volumétrico de la cámara en ese instante (por ejemplo 64.4 ml) y el nivel de descenso del agua L (cm) en la cámara para $t = 0$ tendrá un valor de cero para ese mismo instante (fila 1, columna 4). Las mediciones se realizarán en tiempos iguales, para este caso a cada 30 s (puede variar según el tipo de suelo). Así, en el instante $t + 1$, es decir 30 segundos después (fila 2, columna 1), el volumen V habrá descendido de 64.4 ml a 62.2 m (fila 2, columna 3) y la lectura L (directa sobre el MI) tendrá un valor distinto de cero, en este caso de 0.065 cm (fila 2, columna 4).

Los valores de las columnas y filas siguientes siguen el mismo proceso descrito. La prueba se detiene cuando el valor de V y L se vuelven constantes como se observa en la tabla 9.

TABLA 8
REGISTRO DE DATOS

t (s)	\sqrt{t}	V (ml)	L (cm)
0	0	64.4	0
30	5.48	62.3	0.065

Fuente: Elaboración propia.

TABLA 9
DATOS OBTENIDOS EN CAMPO CON EL MI

t (s)	\sqrt{t}	V (ml)	L (cm)
0	0	64.4	0
30	5.48	62.3	0.065
60	7.75	61.1	0.13
90	9.49	60	0.18
120	10.95	59.4	0.24
150	12.25	59	0.29
180	13.42	58.2	0.3
210	14.49	57	0.34
240	15.49	56.9	0.36
270	16.43	56	0.4
300	17.32	56	0.4

Fuente: Elaboración propia.

Se recomienda medir la profundidad a la que se infiltró el agua, una vez terminada la prueba.

Ejemplo de cálculo

Para calcular la velocidad de infiltración F (cm/h) del MI se construyó la tabla 10, con base en los valores de la tabla precedente. La tabla 10 está formada por 11 filas y 8 columnas de valores (se puede ver que los datos de las columnas 1 a 4 de la citada tabla son los valores de la 9). A continuación se explicará cómo se obtuvieron los datos de las columnas 5 a 8.

Los datos de la fila 1 (columnas 5 y 6) de la tabla 10 tienen un valor igual a cero porque en el instante $t = 0$, no existe ningún volumen (V) infiltrado y ninguna lectura (L) infiltrada, por lo tanto no existe ninguna velocidad de infiltración, F y Fe (segunda fila, columnas 7 y 8). La variable Fe se refiere a la velocidad de infiltración ajustada de acuerdo al apartado “Ejemplo de cálculo” del IDC en el método de Kostiakov.

Así, el valor de la fila 2 y columna 5 se obtiene de la diferencia del valor de la fila 1 y columna 3 menos el valor ubicado en la fila 2 y columna 3, y así sucesivamente, hasta la fila 11 y columna 5.

El valor de la fila 2 y columna 6 se obtiene de la diferencia del valor de la fila 2 y columna 4 menos el valor ubicado en la fila 1 y columna 4, y así sucesivamente, hasta la fila 11 y columna 6.

Los valores de la columna 7 se obtienen del cociente de los valores de la columna 6 entre los incrementos de tiempo de la columna 1, basados en la siguiente ecuación:

$$F = \left(\frac{\Delta L}{\Delta t} \right) 3,600 \quad (4.29)$$

Donde Δt es igual a 30 segundos.

Si se construye una gráfica con los valores de las columnas 1 y 7, la primera como abscisa y la segunda como ordenada, éstos quedan representados como se observa en la figura 14.

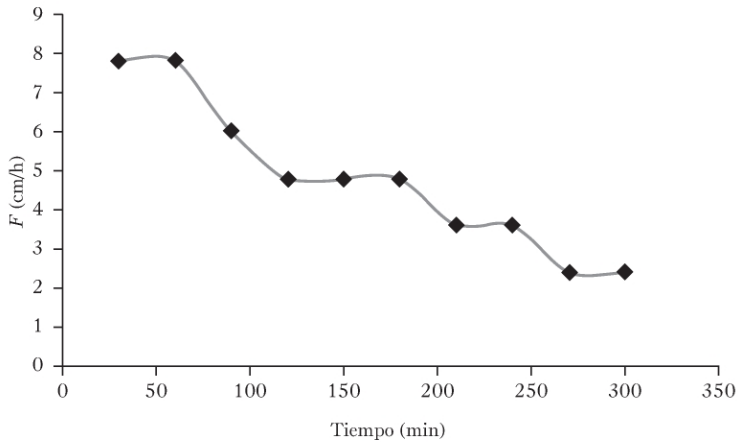
TABLA 10
VALORES DE VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN EN CAMPO

<i>t (s)</i> 1	<i>Sqrt (t)</i> 2	<i>V (ml)</i> 3	<i>L (cm)</i> 4	<i>ΔV (ml)</i> 5	<i>ΔL (cm)</i> 6	<i>F (cm/h)</i> 7	<i>Fe (cm/h)</i> 8
0	0	64.4	0	0	0	0	0
30	5.48	62.3	0.065	2.1	0.065	7.8	8.04
60	7.75	61.1	0.13	1.2	0.065	7.8	6.92
90	9.49	60	0.18	1.1	0.05	6	5.96
120	10.95	59.4	0.22	0.6	0.04	4.8	5.13
150	12.25	59	0.26	0.4	0.04	4.8	4.41
180	13.42	58.2	0.3	0.8	0.04	4.8	3.80
210	14.49	57	0.33	1.2	0.03	3.6	3.27
240	15.49	56.9	0.36	0.1	0.03	3.6	2.81
270	16.43	56	0.38	0.9	0.02	2.4	2.42
300	17.32	56	0.4	0	0.02	2.4	2.08

Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 14

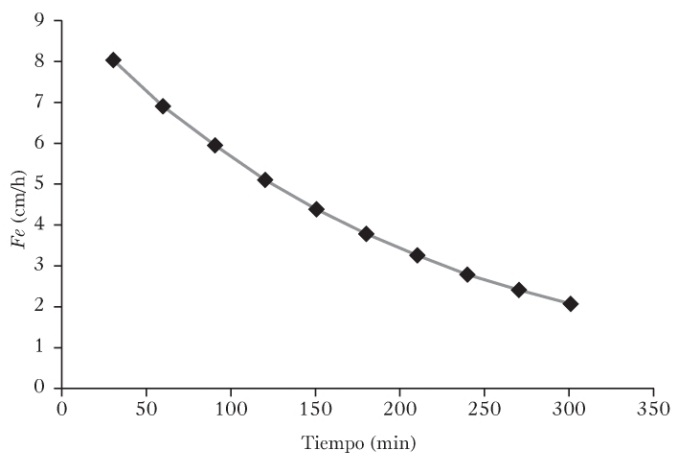
VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN EN CAMPO CON EL MÉTODO DEL MI



Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo todas las medidas experimentales están afectadas por “errores” que generan imprecisiones, como se puede observar también en la figura 11. Debe entenderse como error a la diferencia que existe entre los valores medidos y el valor “verdadero”. Los errores son de “aparato” y “visuales”, razón por la cual, la figura 14 no muestra una curva exponencial descendente “alineada”. Para corregir estos datos y obtener la curva de infiltración teórica o estimada (F_e) que se muestra en la figura 15, se deben ejecutar los procedimientos enunciados en el apartado “Ejemplo de cálculo” del IDC.

FIGURA 15
VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN TEÓRICA O ESTIMADA (F_e)



Fuente: Elaboración propia.

Métodos indirectos para estimar la velocidad de infiltración

Existen muchos métodos para estimar la velocidad de infiltración de forma indirecta. Exponer aquí a la mayoría de ellos excede las pretensiones de este libro. Por tal razón se escogieron cuatro métodos con base en los siguientes criterios: *a)* Que hayan sido descritos en la literatura hidrológica contemporánea; *b)* Ser de carácter empírico y requerir poca información hidrológica; *c)* Ser de carácter empírico y requerir información de un método auxiliar y del suelo donde se pretende estimar la velocidad de infiltración; *d)* Ser un método semiempírico pero que incorpore elementos de la “teoría de infiltración” como: condiciones de encharcamiento del suelo y contenido de humedad inicial y *e)* Exponer al menos un método que incorpore elementos de la teoría de flujo en medios porosos no saturados. Así, se escogieron los métodos Índice Ø, Horton, Holtan, Green-Amp y método de Philip. Éstos cumplen con los requisitos estipulados y pueden estimar la velocidad de infiltración de forma adecuada, algunos de ellos con mayor precisión que otros si se ejecutan de forma planeada, siguiendo las recomendaciones técnicas expuestas en este libro.

En este capítulo se explican las consideraciones técnicas y la metodología para la aplicación correcta de cada uno de los métodos, tomando como ejemplo una cuenca hidrológica de 200 km², cuya superficie tiene un alto contenido de vegetación y áreas de cultivos en surcos (agrícola-herboso) con una maduración

cercana al 80 por ciento y un tipo de suelo caracterizado como migajón limoso.

Para efectos de cálculo se presenta el hietograma de una tormenta ocurrida en dicha cuenca, como el que se observa en la figura 16. Esta tormenta produjo un volumen de escurrimiento (V_{ed}) de 16'000,000 m³ (Aparicio, 1989).

MÉTODO DEL ÍNDICE \emptyset

Este método también se denomina índice de infiltración media. La hipótesis fundamental del método es que la velocidad de infiltración es constante y que el tiempo de encharcamiento es instantáneo, la cual es una de sus mayores limitaciones (Aparicio, 1989).

Sin embargo, el método es muy sencillo, sólo necesita información de lluvia y escurrimiento sobre el área de estudio, por esa razón sólo debe usarse para tener una idea general de la tasa de infiltración en una cuenca determinada, no es recomendable para la planeación y diseño de proyectos, cuando mucho se puede usar para pre-proyectos o estudios de gran visión.

Metodología

La metodología de cálculo se reduce a dos pasos:

1. Estimar h_{pe} .
2. Estimar el índice \emptyset .

Para estimar la velocidad de infiltración con este método se debe calcular primero la precipitación efectiva (h_{pe}), con la siguiente ecuación:

$$h_{pe} = \frac{V_{ed}}{A} \quad (5.1)$$

V_{ed} = Volumen de escurrimiento directo (m^3)

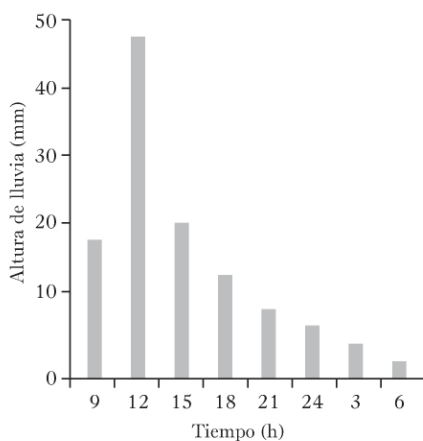
A = Área de la cuenca (m^2)

Por lo tanto, la precipitación efectiva es:

$$h_{pe} = \frac{16'000,000 \text{ m}^3}{2 \times 10^8 \text{ m}^2} = 0.08 \text{ m}$$

Luego se estima el índice \emptyset trazando una horizontal en el hietograma de la figura 16, para que la suma de las precipitaciones que queden arriba de esa paralela sea igual al valor de h_{pe} . Por lo tanto el índice \emptyset será igual a la altura de precipitación correspondiente a la paralela dividida entre el intervalo de tiempo Δt que dura cada barra de dicho hietograma.

FIGURA 16
HIETOGRAMA DE LA TORMENTA



Fuente: Elaboración propia.

TABLA 11
ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE \emptyset

Fecha	Hietograma horas	$\Delta t = 3$ horas Δhp (mm)	Índice de infiltración media		
			$\emptyset = 13$	$\emptyset = 9$	$\emptyset = 5.3$
28 octubre	9				
		16.5	3.5	7.5	11.2
	12	48	35	39	42.7
	15	20	7	11	14.7
	18	12.8		3.8	7.5
	21	9.1		0.1	3.8
	24	5.5			0.2
29 octubre	3	3.1			
	6	1.2			
	9				

Fuente: Elaboración propia.

Solución: para $\emptyset = 5.3$ mm/3 h

$hep = 80.10$ (véase hietograma)

$$\emptyset = 2.665 \text{ mm/h}$$

MÉTODO DE HORTON

En 1940 Horton presentó una ecuación que calcula la capacidad o velocidad de infiltración como se muestra a continuación (María, 2008):

$$I_c = I_a + (I_o - I_a)e^{-kt} \quad (5.2)$$

Donde:

I_c = Capacidad de infiltración (mm/h)

I_o = Capacidad de infiltración inicial (mm/h)

I_a = Capacidad de infiltración final (mm/h)

k = Constante positiva (1/min)

e = Base de los logaritmos naturales

t = Tiempo transcurrido (min)

Del conjunto de variables mostradas en la ecuación 5.2 se han realizado tablas para diferentes tipos de suelo con valores de referencia, con el fin de orientar a los interesados en el rango de cada una de ellas. En la tabla 12 se muestra un ejemplo.

TABLA 12
VALORES ORIENTATIVOS, FÓRMULA DE HORTON

<i>Tipo de suelo</i>	<i>Valores para la fórmula de Horton</i>		
	I_o (mm/h)	I_c (mm/h)	k (1/min)
Agrícola desnudo	280	6-220	1.6
Agrícola herboso	900	20-290	0.8
Turba	325	2-20	1.8
Areno-arcilloso, desnudo	210	2-25	2
Areno-arcilloso, herboso	670	10-30	1.4

Fuente: Campos, 1987.

Metodología

La metodología para estimar la velocidad de infiltración (I_c) con el método de Horton es la establecida en Campos (1987):

1. En este ejemplo se tomarán los datos de campo obtenidos con el IDC (véase tabla 2):

TABLA 13
VALORES OBTENIDOS CON EL IDC

$t \text{ (min)}$ (1)	$I = I_c \text{ en campo (cm/h)}$ (2)
3	8.28
4	7.08
7	5.26
13	4.02
23	3.054
38	2.384
63	1.899
93	1.354
123	1.416
190	0.961
250	0.9
310	0.899
$\Sigma 1117$	$\Sigma 37.51$

Fuente: Elaboración propia.

2. Se aplican logaritmos a la ecuación 5.2:

$$\log(I_c - I_a) = \log(I_0 - I_a) - k \log e^t \quad (5.3)$$

3. De acuerdo a Horton (1940) la variable I_a alcanza un valor constante después de un periodo cercano a las tres horas. Por lo tanto de la tabla 13 se asume un valor $I_a = 9.61 \text{ mm/h}$ para un $t = 190 \text{ min}$. Así, se reescribe la tabla 13 con $(I_0 - I_a)$, t y sus logaritmos:

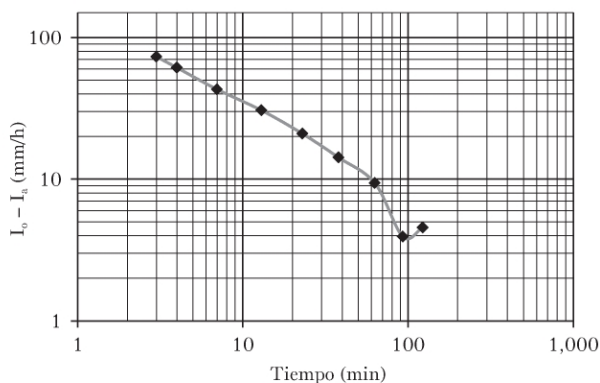
TABLA 14
LOGARITMOS DE LAS VARIABLES ($I_o - I_a$) y t

t (min)	I_o (cm/h)	$I_o - I_a$ (mm/h)	$\log(I_o - I_a)$	$\log(t)$
3	8.28	73.19	1.864451747	0.47712125
4	7.08	61.19	1.786680453	0.60205999
7	5.26	42.99	1.633367445	0.84509804
13	4.02	39.59	1.597585501	1.11394335
23	3.054	20.93	1.320769228	1.36172784
38	2.384	14.23	1.1532049	1.5797836
63	1.899	9.38	0.972202838	1.79934055

Fuente: Elaboración propia.

4. Se dibuja la columna ($I_o - I_a$) vs. t en papel logarítmico.

FIGURA 17



Fuente: Elaboración propia.

5. La ecuación 5.3 es una recta cuya pendiente (m) es:

$$m = \frac{-1}{\log(ek)} = t \quad (5.4)$$

Como se puede ver en la recta de la figura 17: $(I_c - I_a) = 9.61$ mm/h le corresponde un tiempo de 63 minutos. Así:

$$\frac{-1}{\log(ek)} = -63 \text{ min} \quad (5.5)$$

Por lo tanto: $k = -0.0365$

6. De la ecuación 5.2 ya se conocen las variables I_a y k , es necesario conocer $(I_o - I_a)$.

Cuando $t = 0$ se puede demostrar que $I_c = I_o$.

Por lo tanto la ordenada de la figura 17 es:

$$I_c - I_a = I_o - I_a$$

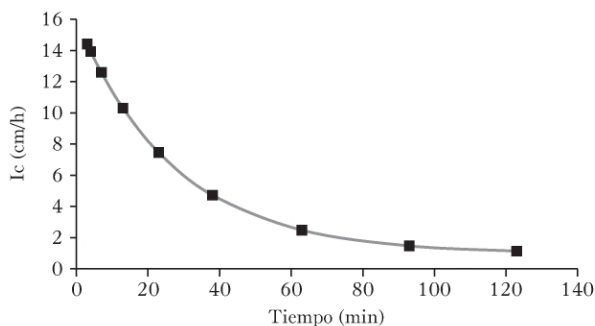
y justo en $t = 0$ esta ordenada vale 150 cm/h, por lo tanto: $I_o - I_a$ de la ecuación 5.2 vale 150 cm/h.

7. Conociendo las variables de la ecuación 5.2 y sustituyendo valores se tiene:

$$I_c = 9.61 + 150e^{(-0.0365)(t)} \quad (5.6)$$

8. Sustituyendo los valores de tiempo (t) de la tabla 13 en la ecuación 5.6 se obtiene la velocidad de infiltración con el método de Horton que se observa en la figura 18.

FIGURA 18
VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN CON EL MÉTODO DE HORTON



Fuente: Elaboración propia.

MÉTODO DE HOLTAN

La fórmula propuesta por Holtan toma en consideración el índice de crecimiento de la vegetación o cultivo (madurez), cobertura vegetal, uso de suelo y humedad en la capa superior del mismo. De acuerdo con Holtan (1975), la velocidad de infiltración se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$f_p = \frac{GI}{100} a S_a^{1.4} + f_c \quad (5.7)$$

Donde:

f_p = Capacidad de infiltración (mm/h)

GI = Madurez de la vegetación o cultivo en porcentaje

a = Relacionado con la cobertura del suelo (madurez de plantas y época del año)

S_a = Almacenamiento disponible en la capa superficial del suelo (no ocupada por agua)

f_c = Infiltración constante (mm/h). Según Horton se alcanza a las tres horas de la prueba

n = En este caso $n = 1.4$ (para suelos limosos)

La variable S_a es la humedad del suelo, aproximadamente a 15 cm de profundidad y se estima de la siguiente manera (Holtan, 1975):

$$S_{at} = S_{a(t-1)} - f_p(t-1) + f_c \quad (5.8)$$

Donde $S_{a(t-1)}$ es el almacenamiento antecedente, $f_p(t-1)$ es la capacidad de infiltración antecedente y el subíndice t indica el intervalo de tiempo.

Por otra parte, si no se dispone de información sobre la madurez de la vegetación o cultivos, GI se puede estimar con la siguiente ecuación:

$$GI = \frac{E_p}{E_{pt}} \quad (5.9)$$

Donde E_p es la evapotranspiración potencial semanal o mensual y E_{pt} es la evapotranspiración potencial máxima anual.

Por otra parte, en la tabla 15 se pueden apreciar valores del parámetro “a” relacionado con el uso o cobertura del suelo.

TABLA 15
VALORES DE “a”

Uso del suelo o cobertura	Clasificación del área representativa	
	Condición pobre	Condición buena
Barbecho	0.1	0.3
Cultivos en surcos	0.1	0.2
Granos pequeños	0.2	0.3
Zacate (legumbres)	0.2	0.4
Pastura (césped)	0.4	0.6
Pastura (rastrero)	0.2	0.4
Pastos temporales (césped)	0.4	0.6
Pastos permanentes (césped)	0.8	1
Maderas y bosques	0.9	1

Fuente: Holtan, 1975.

En la tabla 16 se muestran algunos valores de f_c .

TABLA 16
VALORES DE f_c

<i>Tipo de suelo (horizonte)</i>	<i>Valor de f_c (pulg/h)</i>
Suelo rico en materia orgánica	0.45-0.3
Zona de acumulación de coloides	0.3-.15
Subsuelo, material intemperizado	0.15-.05
Roca subyacente	0.05-.00

Fuente: Musgrave, 1955.

Metodología

1. Utilice los datos del IDC (columnas 1 y 2, de la tabla 3).
2. Reescriba la tabla 13 con las columnas que se muestran en la tabla 17, que incluyen las ecuaciones y relaciones establecidas por Holtan (1975).

TABLA 17

<i>Infiltración mm/h</i> (1)	<i>t (min)</i> (2)	<i>S_{at(t-1)}</i> (3)	<i>f_{p(t-1)}</i> (4)	<i>S_{at} (mm/h)</i> (5)	<i>f_p (mm/h)</i> (6)
82.8	3				
70.8	4				
52.6	7				
—	—				
—	—				
8.99	310				

Fuente: Elaboración propia.

3. El primer valor de $S_{at(t-1)}$ (fila 1, columna 3) de la tabla 18 es cero un instante antes de que empiece la prueba, justamente porque no se ha iniciado el humedecimiento del suelo. Por la misma razón el valor de la velocidad de infiltración $f_{p(t-1)}$ también es cero (fila 1, columna 4). Sin embargo, en el instante t , justo en los tres primeros minutos de iniciada la

prueba el valor de S_{at} (fila 1, columna 5) se estima utilizando la ecuación 5.8 donde $S_{a(t-1)}$ y $f_{p(t-1)}$ son iguales a cero, por lo que dicha ecuación sólo depende de f_c . Holtan sugiere utilizar f_c a partir de los valores determinados por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos, para cada una de las clases de suelos (A, B, C y D), el cual varía entre 0 y 11.4 mm/h. Sin embargo, f_c representa la velocidad de infiltración constante en mm/h, por lo que de acuerdo a Horton se alcanza a las 3 h de la prueba. Por lo tanto, asumiendo este último argumento, la infiltración constante se alcanza según la tabla 3 a los 190 min y corresponde a un valor de $f_c = 9.61$ mm/h. Sustituyendo los valores respectivos en la ecuación 5.8 se obtiene $S_{at} = 9.61$ mm/h (véase fila 1, columna 5).

4. Por otro lado, de acuerdo a las características de la vegetación del sitio de estudio se supone el valor de GI en función de la madurez del cultivo o de la vegetación de la cuenca. De acuerdo a la zona de estudio planteada al inicio del capítulo V, se trata de una cuenca con mucha vegetación y áreas de cultivos con un porcentaje de madurez cercano al 80 por ciento. Por lo tanto: $GI = 80$.
5. De las tablas 15 y de acuerdo a la condición del suelo (pobre o buena) se propone el valor de " a ". Por lo tanto se sugiere $a = 0.20$ (cultivo en surco, condición buena).
6. Conocidos " GI ", " a " y " f_c " se utiliza la ecuación 5.7 para estimar los valores de f_p de la tabla 18, por lo tanto:

$$f_p = \left(\frac{80}{100} \right) (0.20) S a^{1.4} + 9.61 \quad (5.10)$$

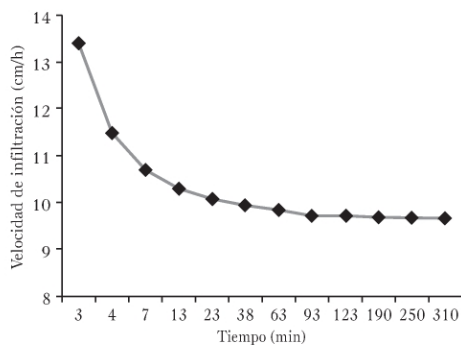
TABLA 18
ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN CON HOLTAN

Infiltración cm/h (1)	t (min) (2)	$S_{a(i-1)}$ (3)	$f_{p(i-1)}$ (4)	S_{a_i} (mm/h) (5)	f_p (mm/h) (6)
82.8	3	0	0	9.61	13.41
70.8	4	9.61	13.41	5.81	11.49
52.6	7	5.81	11.49	3.93	10.69
40.2	13	3.93	10.69	2.85	10.30
30.54	23	2.85	10.30	2.16	10.08
23.72	38	2.16	10.08	1.69	9.94
18.99	63	1.69	9.94	1.36	9.85
13.54	93	1.09	9.85	0.85	9.73
12.16	123	0.85	9.73	0.73	9.71
9.61	190	0.71	9.71	0.61	9.69
9	250	0.61	9.69	0.53	9.67
8.8	310	0.53	9.67	0.47	9.66

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 19 se puede ver la velocidad de infiltración estimada con el método de Holtan.

FIGURA 19
VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN CON EL MÉTODO DE HOLTAN



Fuente: Elaboración propia.

MÉTODO DE GREEN Y AMPT

Green y Ampt, en 1911 propusieron un modelo simplificado para explicar la infiltración basado en la suposición de la existencia de un frente húmedo entre la columna saturada y la no saturada del suelo. Las hipótesis fundamentales del modelo son las siguientes: *a)* El suelo está totalmente saturado desde la superficie hasta el frente húmedo; por debajo, el suelo continúa en las condiciones previas a la precipitación. A medida que el frente húmedo avanza en profundidad, estas condiciones permanecen válidas, *b)* En la superficie del frente húmedo (que separa el suelo saturado del no saturado) la tensión capilar es siempre la misma, independiente de la posición y del tiempo (Weber *et al.*, 2013). El método de Green y Ampt es semiempírico e incorpora aspectos de la “teoría de infiltración” como: condiciones de encharcamiento del suelo, contenido de humedad inicial uniforme y frente de avance de humedad también uniforme. De acuerdo a Chávarri (2004) la capacidad de infiltración se calcula con la siguiente ecuación:

$$f = K_s \left(1 + \frac{[(M_d)(H_f)]}{F} \right) \quad (5.11)$$

Donde:

f = Capacidad de infiltración (mm/h)

K_s = Conductividad hidráulica en saturación natural (mm/h)

M_d = Déficit de humedad inicial (adimensional)

H_f = Succión en el frente húmedo, en mm de columna de agua

F = Infiltración acumulada en mm

La ecuación 5.11 incorpora el término *factor de succión de almacenamiento* (S_f):

$$Sf = [(M_d)(H_f)] \quad (5.12)$$

Por lo tanto la ecuación 5.11 se puede re-escribir de la siguiente manera (Campos, 1987):

$$f = K_s \frac{S_f + F}{F} \quad (5.13)$$

La ecuación 5.13 no permite evaluar la velocidad de infiltración inicial porque cuando F tiende a cero, f tiende a infinito (Campos, 1987). Esta es una limitación relevante del método de Green y Ampt.

Metodología

1. La infiltración acumulada (F) que se muestra enseguida, se obtiene integrando la ecuación 5.2 de Horton con respecto al tiempo, por lo tanto de acuerdo a Campos (1987):

$$F = \frac{I_c t}{60} + \frac{I_0 - I_c}{60k} (1 - e^{-kt}) \quad (5.14)$$

Esta fórmula tiene menos dispersión que otras similares en los valores iniciales. Los valores de las variables de la ecuación 5.14 son los valores estimados en el apartado “Método de Horton”. Así, en la tabla 15 se pueden observar los datos del IDC y los valores de F estimados con la ecuación 5.14.

Así, la ecuación 5.13 se puede representar como una recta en un plano cartesiano representando en el eje de las ordenadas los logaritmos (log) de la velocidad de infiltración acumulada (F) en mm (columna 4 de la tabla 19) y en las abscisas el logaritmo del tiempo (t) en min (columna 1 de la tabla 19), como se observa en la figura 20. La pendiente de la recta mostrada en

TABLA 19
INFILTRACIÓN ACUMULADA CON EL MÉTODO DE GREEN Y AMPT

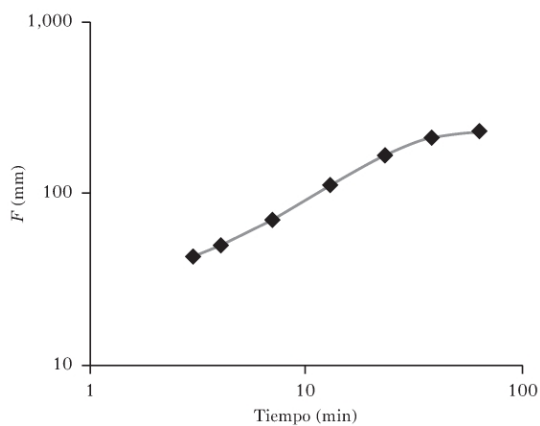
t (min)	I_o (cm/h)	I_c (mm/h)	F (mm)
3	8.28	135.481103	4.29
4	7.08	130.98316	5.01
7	5.26	118.430952	7.06
13	4.02	97.0866707	11.25
23	3.054	70.403683	16.67
38	2.384	44.8314935	21.21
63	1.899	23.7915366	23.01
93	1.354	14.370164	21.91
123	1.416	11.2077931	24.31

Fuente: Elaboración propia.

dicha figura es S_f y la constante de la misma es K_s . Los valores de la pendiente y la constante leídos en la figura 20 son los siguientes:

$$S_f = 3.28 \text{ y } K_s = 55.78$$

FIGURA 20
 F (mm) vs. t (min)



Fuente: Elaboración propia.

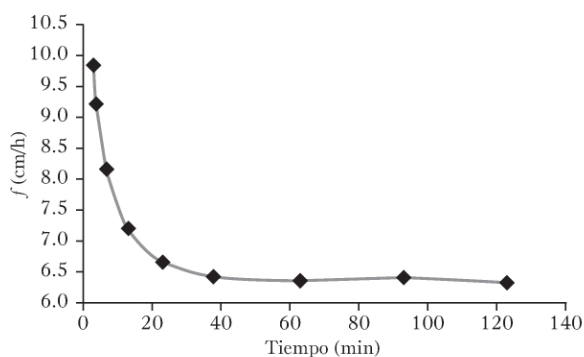
2. Una vez construida la tabla 19 y estimados los valores S_f y K_s , con la ecuación 5.13 se calcula la velocidad de infiltración para los tiempos que se muestran en la columna 1 de la tabla 20:

TABLA 20
VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN

t (min)	f (cm/h)
3	9.84
4	9.22
7	8.17
13	7.20
23	6.67
38	6.44
63	6.37
93	6.41
123	6.33

Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 21
VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN CON EL MÉTODO DE GREEN Y AMPT



Fuente: Elaboración propia.

MÉTODO DE PHILIP

Philip partió de la ecuación de flujo en medios porosos no saturados o ecuación de Richards para obtener, mediante la transformación de Boltzmann (Chow *et al.*, 1994), una ecuación diferencial ordinaria que publicó en 1957, donde la infiltración acumulada $F(t)$ es:

$$F(t) = St^{1/2} + kt \quad (5.16)$$

En la ecuación 5.16 k representa la conductividad hidráulica y S la sortividad. Derivando la ecuación 5.16 se obtiene la velocidad de infiltración con el método de Philip (Weber, 2015):

$$f(t) = \frac{1}{2}St^{-1/2} + k \quad (5.17)$$

La sortividad S describe la absorción de agua por el suelo como resultado del gradiente de potencial mátrico, es decir, representa la entrada de agua en el suelo por efecto del potencial matricial, consecuencia de las fuerzas de capilaridad, de adhesión y de cohesión al interior del suelo. Por su parte, la conductividad hidráulica k depende del contenido de agua inicial y del tipo de suelo, es una especie de “infiltración base” ya que si $t \rightarrow \infty$, $f \rightarrow k$. En la ecuación 5.16 se aprecia la indeterminación asociada al valor $t = 0$, lo que se traduce en la inexistencia de una tasa inicial de infiltración como en el modelo de Horton (Weber, 2015).

Metodología

1. Se estima en campo los valores de S y k de la ecuación 5.16.
2. Así, para el suelo migajón limoso de la cuenca descrita de forma breve al inicio del capítulo V, se obtuvieron valores de $k = 1.95 \text{ cm } h^{-1}$ y $S = 5.2 \text{ cm } h^{-1/2}$.

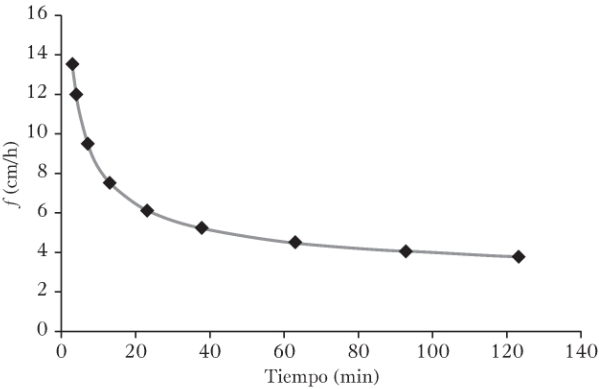
3. Sustituyendo estos valores y el tiempo (t) de la tabla 21 (columna 1) en horas en la ecuación 5.17, se estimó la velocidad de infiltración (f) con el método de Philip que se muestra en la siguiente tabla.

TABLA 21
VALORES DE f (cm/h)

t (min)	f (cm/h)
3	13.58
4	12.02
7	9.56
13	7.54
23	6.15
38	5.22
63	4.49
93	4.04
123	3.77

Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 22
VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN CON EL MÉTODO DE PHILIP



Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

A pesar de la importancia que tiene el fenómeno de infiltración para la realización de balances hídricos en una cuenca o para conocer la capacidad de infiltración de suelos agrícolas, a la fecha no existen métodos refinados basados en la teoría de infiltración que resulten fáciles de aplicar en campo. Los modelos matemáticos o numéricos del fenómeno tienen variables cuya disponibilidad dificulta su aplicación.

Mientras el estado del arte de la infiltración progresa y los modelos y avances estén en proceso de refinamiento, se tendrán que usar los métodos empíricos para calcular la velocidad de infiltración. De allí la relevancia de este libro.

A lo largo de cinco capítulos se ha expuesto el concepto de infiltración, así como los factores que afectan su proceso en función de las características físicas e hidráulicas del suelo.

Así, sin pretender ser un manual se han expuesto tres métodos directos y cuatro indirectos para estimar la velocidad de infiltración en suelos agrícolas y cuencas hidrológicas pequeñas.

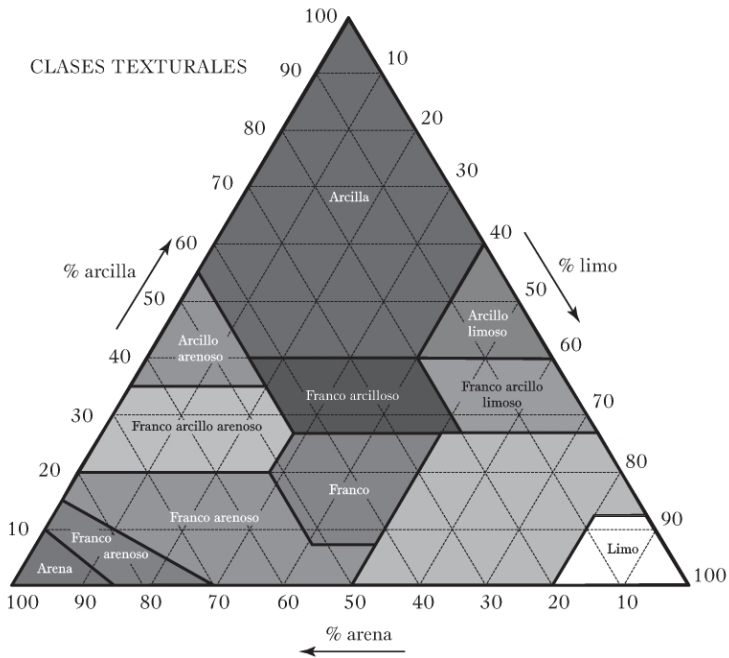
Por su facilidad de aplicación se recomienda utilizar en parcelas agrícolas el método del IDC. Bouwer (1986), Amerman (1983), Youngs (1987) y Ponce (1989) lo consideran un buen método. De acuerdo con Porta (1999) y con el fin de mejorar los resultados de este método, se sugiere realizar pruebas triples en una misma serie de suelo en una distancia mínima de 10 metros. Por otra parte, Gifford *et al.* (1978) considera que se ob-

tienen mejores resultados de velocidad de infiltración con el método de Simulación de Lluvia (SL). Sin embargo conviene tomar en cuenta que Touma *et al.* (1992) encontraron que el IDC es más apropiado que el SL cuando la superficie de suelo es susceptible de encostramiento. Sin embargo, por su transportabilidad, facilidad de instalación en campo, porque utiliza poca agua y puede replicarse muchas veces en el mismo tipo de suelo se recomienda ampliamente el miniinfiltrómetro explicado en el capítulo IV.

Para pequeñas cuencas el método de Horton, Holtan y Green y Ampt son recomendables, también el miniinfiltrómetro por su facilidad de instalación y la poca agua que utiliza en cada prueba. Sin embargo, para que la velocidad de infiltración sea representativa de la cuenca, se deberá realizar las pruebas en varios sitios: si son dos sitios (puntos) éstos deben estar opuestos, si son tres deberá formarse un triángulo, si son cuatro deberá formarse un cuadrado, si son cinco deberá formarse dos triángulos unidos por uno de sus vértices y así, procurando formar figuras geométricas que representen toda la superficie. Cada sitio deberá ubicarse en una serie de suelo, entendiendo como serie de suelo a una clase específica con un conjunto similar de características físicas, químicas y biológicas. Los métodos expuestos en este libro no son precisos, por su empirismo y por sus evidentes limitaciones técnicas al no considerar todas las variables del proceso, pero son capaces de proporcionar una idea razonable de la velocidad de infiltración de suelos agrícolas y cuencas hidrológicas pequeñas. Para proyectos específicos o que requieran de mayor exactitud el lector tendrá que recurrir a métodos más precisos no exentos de limitaciones prácticas.

Apéndice A

FIGURA 23
TRIÁNGULO DE TEXTURAS



Fuente: Rucks *et al.*, 2004.

Fuentes consultadas

- AMANCHA, V.E. (2015). *Determinación de la permeabilidad de los suelos basados en la metodología del infiltrómetro de mini disco en la zona de Yanahurco, Napo*. Tumbaco, Ecuador: Facultad de Ciencias Agrícolas. Universidad Central del Ecuador.
- AMERMAN, C.R. (1983). *Infiltration measurement*. Proc. Conf. On Advances in infiltration. Chicago. ASAE Publication, 201-214.
- AOKI, A. y R. Sereno (2005). *Comparación de metodologías de cálculo de propiedades hidráulicas de un suelo a partir de datos medidos con infiltrómetro de disco*. Agricultura Técnica. 65(2), 204-209.
- APARICIO MIJARES, F.J. (1989). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. 1ª ed. México: Limusa.
- BENITO, E., E. de Blas, J.L. Santiago y M.E. Varela (2001). *Descripción y puesta a punto de un simulador de lluvia de campo para estudios de escorrentía superficial y erosión del suelo*. Cuadernos Lab. Xeolóxico d Laxe. Vol. 6, 211-220.
- BAVER, L.D., W. Gardner y R. Gardner (1980). *Física de suelos*. 1ª ed. México: UTHEA.
- BLANCO, S.R. (1999). *El infiltrómetro de cilindro simple como un método de cálculo de la conductividad hidráulica de los suelos. Experiencia de campo en ámbitos de montaña mediterránea*. Baética. Estudios de Arte, Geografía e Historia. Vol. 21, 9-33, 16. Universidad de Málaga.
- BOUWER, H. (1986). "Intake rate: Cylinder infiltrometer". En Page, A.L. Miller, R.H., Keeney, D.R. (eds.), *Methods of Soil Analysis. Part. I. Physical and Mineralogical Methods*. 2ª ed. Agronomy 9. Madison. Wisconsin, USA, 825-844.
- CAMPOS ARANDA, D.F. (1987). *Procesos del ciclo hidrológico*. Tomos (I, II). 1ª reimp. San Luis Potosí, México: Ed. Universidad Potosina.

- CERDA, I.C. (1995). *Factores y variaciones espacio temporales de la infiltración en los ecosistemas mediterráneos*. Ed. Geoforma, Logroño.
- CISNEROS, A.R. (2003). *Apuntes de la materia de riego y drenaje*. San Luis Potosí, México: Facultad de Ingeniería. Centro de Investigación y Estudios de Posgrado y Área Agro-geodésica. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- CHÁVARRI, V.E. (2004). *Curso de hidrología aplicada*. Lima, Perú. Facultad de Ingeniería Agrícola. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- CHOW, V.T., D.R. Maidment y L.W. Mays (1994). *Hidrología aplicada*. Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Interamericana, S.A.
- DECAGON (2016). *Mini disk infiltrometer*. User's Manual. Version: September 2, 2016. Decagon device, Inc.
- GODAGNONE, R., C. Irurtia, R. Holzmann y M. Cuenca (2012). *Pérdidas de agua por flujo lateral en un infiltrómetro de anillo simple*. Mar del Plata, Argentina: XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo.
- GIFFORD, G.F. y R.H. Hawkins (1978). *Hidrologic impact of grazing on infiltration: A critical review*. Water Resource Research, 14-2, 305-313.
- GUEVARA P, E., R.A. Márquez (2012). "Modelación de la infiltración en un campo agrícola de la cuenca del río Chirgua", estado de Carabobo, Venezuela. *Revista científica UDO Agrícola*, 12(2): 365-388.
- HOLTAN, H.N. (1975). *A formulation for quantifying the influence of soil Porosity and vegetation on infiltration*. París: UNESCO SC 75/WS/100.
- HORTON, R.E. (1940). An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. *Proc. Soil. Sci. Am.*, 5, 399-417.
- JUÁREZ, B., Rico, R. et al. (1985). *Fundamentos de mecánica de suelos*. Tomo (I). 3ª ed. México: Limusa.
- IBÁÑEZ, A.S., R.H. Moreno y J.M. Blanquer (2009). *Características del infiltrómetro de doble anillo (anillos de Munz)*. Valencia, España: Centro Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica de Valencia.
- KRAMER, P. (1974). *Relaciones hídricas de suelos y plantas*. 1ª ed. México: EDUTEX.

- LÓPEZ, C.F. y A.J. Mintegui (1986). *Hidrología de superficie (1ª. parte)*. Madrid, España: Fundación Conde del Valle de Salazar. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes.
- MARÍA, R.T. (2008). *Acoplamiento de los procesos de escurrimiento superficial e infiltración*. Tesis doctoral. Córdoba, Argentina: Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba.
- MARTÍNEZ, A.P., M.D. Mundo Molina y G.M. Carrillo (1994). *Measurement devices for irrigation water*. International Journal of Water Resources Development. Vol. 10, Issue 3, 339-350.
- MARTÍNEZ, F.J. (1992). *Variabilidad espacial de las propiedades físicas e hídricas de los suelos en medio semiárido mediterráneo. Cuenca de la Rambla de Perea (Murcia)*. Universidad de Murcia.
- MARTÍNEZ, F.J. y B.F. López (1996). *Métodos para el estudio de las propiedades hídricas de suelos y formaciones superficiales*. Cuaderno Técnico de la SEG No. 9. Geoforma ediciones.
- MILLY, P. (1986). "Advances in Modeling of Water in Unsaturated Zone", en *Groundwater flow and Quality Modelling*, E. Custodio, Gurgui, A., Lobo F.P., ed., D. Reidel. Co., 489-514.
- MONGE, J.R. y P.J. Aguilar (2008). *Manual de operación del simulador de lluvia para la cuantificación de la infiltración, escorrentía y erosión de suelos*. San José, Costa Rica: Escuela Ingeniería Agrícola, Universidad de Costa Rica.
- MORET, D. y J.L. Arrúe (2007). Characterizing soil water-conducting macro- and mesoporosity as influenced by tillage using tension infiltrometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71, 500-506. En: Moret, F.D., González, C.C. (2009). *Nuevo método de medida de tasa de infiltración de agua en el suelo por infiltrometría de disco*. Barcelona, España: IX Jornadas de Investigación de la Zona no Saturada del Suelo.
- MORET, F.D. y C.C. González (2009). *Nuevo método de medida de tasa de infiltración de agua en el suelo por infiltrometría de disco*. Barcelona, España: IX Jornadas de Investigación de la Zona no Saturada del Suelo.

- MUNDO MOLINA, M.D. (2009). Estandarización de las ecuaciones para estimar la evapotranspiración del cultivo de referencia. *Revista Ingeniería, Investigación y Tecnología*. Vol. V. No. 2. 125-135.
- (2013). *Estimación de caudales mediante cuatro métodos hidrométricos en el manantial ubicado en el municipio de Tuxtla Gutiérrez, en las siguientes coordenadas geográficas: 16° 41' 52" norte y 93° 11' 56" oeste, en el acceso del restaurant "El Peje de Oro"*. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas: Informe técnico final. Premezclados Industriales del Sureste.
- (2014). *Kp pan evaporation and ET₀ monthly maps using information of 60 weather observatories included in the climate normals (1941-1970) from Mexico*. Journal of Water Resource and Protection, 6, pp. 1475-1500. <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2014.615136>
- MUSGRAVE, G.W. (1955). *How much of the rain enters the soil?* U.S. Dept. Agr. Yearbook. 151-159.
- PARLANGE, J.Y., I.G. Lisle, R.D. Braddock y R.E. Smith (1982). *The Three-Parameter Infiltration Equation*, Soil, Sci., 133(6), 337-341.
- PERROUX, K.M. y I. White (1988). Designs for disc permeameters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52, 1205-1215. En: Moret, F.D., González, C.C. (2009). *Nuevo método de medida de tasa de infiltración de agua en el suelo por infiltrometría de disco*. Barcelona, España: IX Jornadas de Investigación de la Zona no Saturada del Suelo.
- PORTA, C. J. (1999). *Edafología. Para la agricultura y el medio ambiente*. 2ª ed. Madrid, España: Ed. Mundi. Prensa.
- PONCE, V.M. (1989). *Engineering hydrology. Principles and practices*. New Jersey: Prentice Hall.
- RIJTEMA, P.E. (1965). *An analysis of actual evapotranspiration*. Wageningen, Netherlands, Institute for Land and Water Management Research, 107 p. (Agricultural Research Report 659).
- RUCKS, L., F. García, A. Kaplán y J. Ponce de León (2004). *Propiedades físicas del suelo*. Departamento de Suelos y Aguas. Montevideo, Uruguay: Facultad de Agronomía. Universidad de la República.

- SARH (1978). *Instructivo para el manejo y reporte de experimentos agrícolas bajo condiciones de riego*. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Dirección General de Distritos de Riego (SARH).
- SMITH, R.M. y D.R. Browning (1946). Some suggested laboratory standard of subsoil permeability. *Proc. Sci. Ame.* 11: 21-26.
- TABOADA, C., L. Lado, V. Diéguez y G.A. Paz (1998). Evolución temporal de la infiltración superficial a escala de parcela, 101-127. G.A. Paz y C. Taboada (eds.). *Avances sobre el estudio de la erosión hídrica*. La Coruña, España: Universidad de la Coruña.
- TORNÉS, O.N., M.Y. Gómez y F.T. Boicet (2013). “Evaluación de la calidad del riego de la máquina con enrollador modelo IRROMOTOR”. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. Vol. 22. No. 1, pp. 39-44.
- TOUMA, J. y J. Albergel (1992). Determining soil hidrologic properties from rain simulator or double ring infiltrometer experiment: a comparision. *Journal of hydrology*, 135, 73-86.
- VIVAR, S.A. et al. (1993). *Aplicación del modelo de Green-Ampt para infiltrometría de doble anillo con carga variable sobre suelos alterados por labores de preparación para la repoblación*. XIII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Salamanca, MAPA. SECS. 142-150.
- WEBER, J.F., H. Paoli y L. Apestegui (2009). “Micro-simulador de lluvia portátil para estudios hidrológicos”. *Revista Tecnología y Ciencia*. Año 3. No. 6, 53.
- WEBER, J.F. y L. Apestegui (2013). Parámetros el modelo de infiltración de Grenn y Ampt en suelos de la ciudad de Córdoba, Argentina. *Cuadernos del CURIHAM*. vol. 19. 87-103.
- (2015). Estimación de los parámetros del modelo de infiltración de Philip para áreas permeables del ejido urbano de la ciudad de Córdoba, Argentina. *Aqua-LAC*. Vol. 7. No. 1. 39-48.
- YOUNGS, E.G. (1987a). Estimating hidraulic conductivity values for ring infiltrometers measurement. *J. Soil Sci.* 38, 623-632.
- (1987b). Infiltration measurement. A review. *Hidrological processes*, vol. 5, 309-320.

Sobre el autor

El doctor Mundo Molina es maestro en Ingeniería Hidráulica por la División de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería (DEPFI) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Es doctor en Ingeniería por el Departamento de Hidráulica de la Universidad Politécnica de Madrid. De 1992 a 1999 fue investigador en la Coordinación de Hidráulica del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Actualmente es profesor-investigador de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH). Ha realizado más de 80 informes técnicos sobre temas hidráulicos, inundaciones, cambio climático y tecnologías apropiadas para comunidades rurales. Ha impartido cursos en algunas universidades del país, entre otras: Universidad Autónoma de Baja California, UNAM (DEPFI Morelos), UNACH, diversas universidades privadas y cursos especializados a jefes de operación de Riego y Drenaje de los distritos de riego de todo el país. Fue editor en jefe de la revista *Quehacer Científico* de la UNACH. Es revisor de artículos técnicos de la revista *Tecnología y Ciencias del Agua* editada por el IMTA, de la revista científica internacional *Journal of Climate Change* y de la revista internacional *British Journal of Applied Science & Technology*. Ha participado como ponente en diversos eventos técnicos nacionales e internacionales en Estados Unidos, Canadá, España, Italia, Pakistán, Uruguay, Costa Rica, Cuba, Uruguay, Chile, Perú, Argentina y Tailandia. Tiene en su haber más de 70 publicaciones

a nivel nacional e internacional, tanto en revistas arbitradas como Journals. Ha publicado dos libros: *Tecnologías alternativas en hidráulica* y *Vive la Ciencia*. Ha ganado dos premios internacionales: Premio a las mejores prácticas de Ingeniería otorgado por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) y el gobierno de Emiratos Árabes Unidos en 2010 y el Energy Global Award otorgado por el gobierno de Austria en el año 2013, así como ocho premios nacionales, entre los más relevantes: Premio Chiapas en Ciencia 2013 y Reconocimiento al Mérito a la investigación científica en el año 2015. Tiene dos patentes en trámite ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI).

Índice

Presentación.....	5
Capítulo I	
Infiltración.....	9
Definición.....	9
Importancia de la infiltración.....	9
El proceso de infiltración.....	10
Capítulo II	
Factores que afectan a la infiltración.....	13
Características del suelo.....	13
Clasificación.....	13
Textura.....	14
Contenido de humedad inicial.....	15
Contenido de humedad de saturación.....	16
Cobertura vegetal.....	17
Aire atrapado.....	18
Lavado de material fino.....	18
Compactación.....	19
Cambios de temperatura.....	20
Capítulo III	
Relación agua-suelo.....	21
Características hidráulicas.....	21

Capítulo IV

Métodos directos para medir

la velocidad de infiltración	29
Infiltrómetro de doble cilindro (IDC)	30
Simuladores de lluvia	47
Miniinfiltrómetro	59

Capítulo V

Métodos indirectos para estimar

la velocidad de infiltración	71
Método del índice \emptyset	72
Método de Horton	74
Método de Holtan	79
Método de Green y Ampt	84
Método de Philip	88

Conclusiones	91
--------------------	----

Apéndice A	93
------------------	----

Fuentes consultadas	95
---------------------------	----

Sobre el autor	101
----------------------	-----

De la obra
*Métodos empíricos para estimar la velocidad de infiltración
en suelos agrícolas y cuencas hidrológicas pequeñas,*
el proceso editorial se terminó en la Ciudad de México durante el mes de
octubre del año 2018. La edición impresa sobre papel de
fabricación ecológica con *bulk* a 80 gramos,
estuvo al cuidado de la oficina
litotipográfica de la
casa editora.



La infiltración es un componente fundamental del ciclo hidrológico y su cálculo es indispensable para el diseño de obras hidráulicas, tanto en ingeniería de regadíos e ingeniería hidrológica como en ingeniería hidráulica. Por tal razón este libro fue elaborado para profesionales de la ingeniería civil, ciencias agronómicas y ciencias del agua que necesiten estimar la velocidad de infiltración en suelos agrícolas o realizar balance de agua en cuencas pequeñas. También es útil para ingenieros recién egresados o estudiantes interesados en el tema.

El objetivo del autor es presentar varios métodos para estimar la velocidad de infiltración del agua en suelos agrícolas y cuencas hidrológicas pequeñas. Este libro no es un manual; sin embargo, cada método es explicado de forma clara y sencilla para facilitar su aplicación en campo, exponiendo las limitaciones y ventajas de cada uno de ellos. Los métodos expuestos se clasifican de la siguiente manera: métodos directos, como el Infiltrómetro de Doble Cilindro, Simulador de Lluvia y Mini infiltrómetro; métodos empíricos indirectos, como el Índice ϕ , Horton y Holtan; métodos indirectos con bases físicas, como el de Green y Ampt que se fundamenta en observaciones empíricas y algunos procesos físicos del fenómeno, y el método de Phillip basado en la teoría de flujo en medios porosos no saturados.

Así, la obra que el lector tiene en sus manos es de carácter práctico y utilitario, por tal razón no se desarrollan los elementos teóricos del fenómeno ni se explican los métodos más refinados como los de Teoría de la Infiltración, porque está fuera de los objetivos de este libro y requieren datos que no son fáciles de medir en campo o que sólo se obtienen a través de pruebas de laboratorio.



CIENCIA Y
TECNOLOGÍA



4 décadas
MA Porrúa
1978-2018 • México

ciencias
sociales