

## MICROELEMENTOS EN LA AGRICULTURA

Eyal Ronen  
Israel

### INTRODUCCION

El incremento de los cultivos con altos rendimientos y con mejor calidad resulta en un incremento en la demanda de microelementos. La productividad de la planta se ha incrementado a lo largo de los años debido al desarrollo genético y a la selección de cultivares de alto rendimiento. Estos cultivares con métodos intensivos de siembra se ha encontrado que remueven grandes cantidades de micronutrientes del suelo, conduciendo a deficiencias en muchos suelos. En este artículo se revisará los microelementos, su importancia, los problemas que afecta su suministro y la forma de vencer estos problemas de disponibilidad. Las plantas necesitan agua, luz, temperatura apropiada y nutrientes para su crecimiento. Las plantas absorben carbono, hidrógeno y oxígeno del agua. Los otros 14 nutrientes provienen del medio de crecimiento o del suelo.

Los nutrientes de suelo están divididos en dos grupos de acuerdo a la cantidad demandada por la planta. Los macronutrientes son aquellos que son demandados en cantidades relativamente altas. En el grupo de los macronutrientes podemos distinguir dos sub-grupos, los principales y secundarios. Nutrientes como el nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) son considerados como los macroelementos principales y el calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S) son los secundarios.

Las micronutrientes son aquellos que se necesitan sólo en cantidades traza, como el hierro (Fe), manganeso (Mn), boro (B), zinc (Zn), cobre (Cu), molibdeno (Mo), cloro (Cl), sodio (Na), níquel (Ni), silicio (Si), cobalto (Co) y selenio (Se). Dentro de este grupo de nutrientes existen dos definiciones. La "esencialidad de los elementos minerales", este término fue propuesto por Arnon y Stout (1939), quienes concluyeron tres criterios que deben ser considerados para que un elemento sea esencial:

1. Una planta no deber ser capaz de completar su ciclo de vida ante la ausencia de un elemento esencial.
2. La función del elemento no debe ser reemplazada por otros elementos minerales.
3. Los elementos deben estar involucrados directamente en el metabolismo de la planta.

Este criterio es una guía importante para la nutrición de la planta pero excluye a los elementos minerales benéficos. Los 'elementos benéficos' son aquellos que pueden ser compensados por efectos tóxicos de otros elementos o pueden reemplazar nutrientes minerales en algunas funciones menos específicas como el mantenimiento de la presión osmótica. La omisión de los elementos benéficos en la producción comercial puede significar que las plantas no desarrollen su óptimo potencial genético pero son meramente producidas a un nivel de subsistencia. Existen ciertas divisiones en referencia a que algunos nutrientes deben ser considerados como elementos esenciales, aunque lo son para ciertas especies de plantas.

**Elementos minerales esenciales para plantas superiores e inferiores**

Clasificación	Elemento	Plantas superiores	Plantas inferiores
Macronutrientes principales	N, P, K	+	+
Macronutrientes secundarios	Ca, Mg, S	+	+
Micronutrientes esenciales	Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, Cl, Ni	+	+
Micronutrientes benéficos	Na, Si, Co, Se	+/-	+/-

## IMPORTANCIA DE LOS MICROELEMENTOS

La importancia de los microelementos en la nutrición de la planta no debe ser descuidada aunque sean necesarios en cantidades menores. Esto fue comprendido, en 1840, por el químico alemán Justus von Liebig, quien hizo una principal contribución a la ciencia de la agricultura y a la química biológica. El determinó la “ley de mínimo”, la cual describe el efecto individual de los nutrientes en los cultivos.

<b>Micronutrientes y su rol nutricional en las plantas</b>			
Elemento	Forma disponible	Contribuciones funcionales	Concentraciones promedio en el tejido vegetal (ppm)
Hierro	$Fe^{2+}/Fe^{3+}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Promueve la formación de clorofila</li> <li>• Mecanismo enzimático que opera en el sistema respiratorio celular.</li> <li>• Reacciones que involucran la división y crecimiento celular.</li> </ul>	100
Manganeso	$Mn^{2+}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Predominante en el metabolismo de ácidos orgánicos.</li> <li>• Activa la reducción del nitrato y la hidroxilamina a amonio.</li> <li>• Rol en importantes enzimas involucradas en la respiración y síntesis de enzimas.</li> <li>• Activador de reacciones enzimáticas como las de óxido/reducción, hidrólisis.</li> <li>• Influencia directa en la conversión de la luz solar en el cloroplasto.</li> </ul>	50
Zinc	$Zn^{2+}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formación de hormonas de crecimiento (auxinas)</li> <li>• Formación de la semilla y el grano.</li> <li>• Promueve la maduración.</li> <li>• Altura de la planta</li> <li>• Síntesis de proteína.</li> <li>• Transformación y consumo de carbohidratos.</li> </ul>	20
Boro	$B(OH)_3$ o $H_3BO_3$ (dependiendo del pH)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Síntesis de proteínas.</li> <li>• Formación de hormonas vegetales.</li> <li>• Promueve la maduración.</li> <li>• Incrementa la floración.</li> <li>• Afecta el metabolismo del nitrógeno y carbohidratos.</li> </ul>	20
Cobre	$Cu^{2+}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relaciones hídricas.</li> <li>• Activador enzimático.</li> <li>• Función principal en la fotosíntesis.</li> <li>• Función principal en la etapa reproductiva.</li> <li>• Enzimas de la función respiratoria.</li> <li>• Rol indirecto en la producción de clorofila.</li> <li>• Incremento en el contenido de azúcares.</li> <li>• Intensifica el color.</li> <li>• Mejora el sabor de las frutas y vegetales.</li> </ul>	6
Molibdeno	$MoO_4$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Esencial para fijación de nitrógeno.</li> <li>• Esencial para la reducción del nitrato.</li> <li>• Esencial para el crecimiento de la planta.</li> </ul>	0.1
Cloro	$Cl^-$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Activador de la enzima que libera oxígeno del agua durante la fotosíntesis.</li> <li>• Regulador de la presión de turgencia, el crecimiento celular y su importancia en la resistencia a la sequía (apertura de las células guardianas).</li> <li>• Contador de iones cargados positivamente (cationes) en la célula.</li> </ul>	100

La ley del mínimo de Liebig es un principio desarrollado en la agricultura que establece que si uno de los elementos nutritivos es deficiente o carente, el crecimiento de la planta será restringido así estén los otros elementos en abundancia. Cualquier deficiencia de un nutriente, no importa si se necesita en pequeñas cantidades, retrasará el desarrollo de la planta. Si la deficiencia del elemento es cubierta, el crecimiento se incrementará al punto donde el suministro no es mayor que el factor limitante. Incrementando el suministro por encima de este punto no ayudará de mucho, ya que alguno de los otros elementos se convertirá en el factor limitante. Liebig usó la imagen de un barril para explicar su ley. La capacidad de un barril con duelas de diferente longitud es limitada por las duelas más cortas, por lo que el crecimiento de la planta es limitado por los elementos suministrados en menor cantidad.

### **ABSORCIÓN DE NUTRIENTES**

Las plantas absorben los nutrientes sólo de la solución suelo. El problema con los microelementos es que están limitados por su solubilidad y su limitada presencia en la solución. La absorción desde la solución suelo se hace por tres rutas principales: intercepción por la raíz, flujo de masa y difusión.

**Intercepción por la raíz:** conforme la raíz prolifera a través del suelo, ellas también se mueven en los espacios previamente ocupados por los nutrientes disponibles en el suelo; por ejemplo, absorbidos por las partículas de arcilla. Las superficies de las raíces pueden interceptar nutrientes durante este proceso de desplazamiento.

**Flujo de masa:** es el movimiento del agua y nutrientes disueltos, los cuales son conducidos por un gradiente de transpiración.

**Difusión:** es el movimiento de nutrientes de acuerdo a un gradiente de alta concentración a uno de baja concentración.

En la difusión, el contenido de humedad tiene un efecto principal, así como la presencia de otros iones, ambos factores pueden incrementar el coeficiente de difusión ( $D_e$ ) de los microelementos y puede incrementar su absorción. La difusión es considerada la principal ruta de absorción de micro elementos especialmente cuando su concentración es limitada en la solución suelo.

La contribución hecha por el flujo de masa al suministro total difiere entre los nutrientes minerales y las especies de las plantas debido a las diferencias en las tasas de transpiración o la tasa de absorción o de ambos.

En el suelo, un gradiente es creado cuando la tasa de absorción de iones excede al suministro por flujo de masa. El perfil de agotamiento se desarrolla con el tiempo y depende principalmente del balance entre la absorción por las raíces, el llenado desde el suelo y la movilidad de los iones por difusión. La movilidad de los iones está definida por el coeficiente de difusión, el cual es uniforme para diferentes iones en un medio homogéneo como el agua y difiere en suelos no homogéneos como los suelos aireados.

### **CARENCIA DE DISPONIBILIDAD**

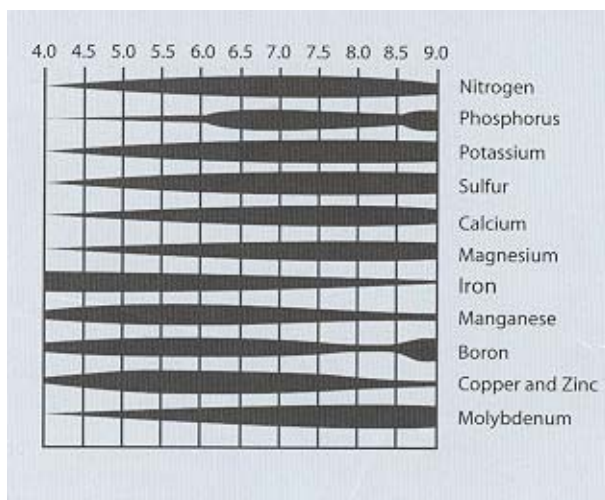
En el suelo, los microelementos no siempre están disponibles en la solución y su disponibilidad está restringida por varios factores, los cuales limitan principalmente la solubilidad. Los principales factores que determinan el nivel de solubilidad de micronutrientes en la solución suelo son:

- Reacciones de óxido-reducción y pH.
- El complejo de unión afinidad descrito como “constante de estabilidad =  $K_{ma}$ ”, frecuentemente referido como  $\log K(MA)$ , la cual es la forma más conveniente de describir el término.

## pH DE LA SOLUCIÓN SUELO

Entre los diferentes factores que afectan la disponibilidad de los microelementos, el pH de la solución suelo es el principal. El pH del suelo está determinado por la medida de la concentración de los iones hidrógeno reflejado como el logaritmo negativo (-log). Cuando las arcillas coloidales son capturadas por iones básicos como el  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{K}^+$ , incrementan la alcalinidad del suelo. Suelos formados en condiciones de bajas precipitaciones, tienden a ser más básicos con lecturas alrededor o mayores a 7.0.

El pH tiene muchos efectos, principalmente en la solubilidad de los microelementos y su forma iónica. A diferentes niveles de pH, algunos nutrientes pueden ser deficientes mientras que otros alcanzan altas concentraciones que causan toxicidad. A pH básico, la mayoría de los microelementos sufren problemas de disponibilidad. La mayoría de las plantas crecen dentro de un rango de pH de 6 a 6.4, que asegura la alta disponibilidad de la mayoría de nutrientes demandados.



Disponibilidad de nutrientes con respecto a los cambios de pH en la solución suelo

## INTERACCIÓN DE NUTRIENTES CON LAS PLANTAS

Algunas de las interacciones interfieren y dañan la disponibilidad de los microelementos. Algunas interacciones ocurren en el suelo y algunas ocurren en el tejido vegetal debido a la excesiva concentración en el tejido.

### Interacciones con macroelementos

**Zinc-fósforo:** altos niveles de P disponibles inducen una deficiencia de zinc. Existen muchas explicaciones: la interacción del suelo con la formación de  $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$ . El antagonismo P-Zn en las raíces afecta la traslocación, el efecto de "dilución" en el tejido debido a la alta tasa de crecimiento que excede la tasa de absorción, fisiológicamente afecta debido a la interferencia del P en la función metabólica del Zn.

**Zinc-nitrógeno:** altas concentraciones de nitrógeno induce deficiencia de zinc, debido a: un incremento en la tasa de crecimiento con un suministro marginal de zinc, retención de zinc en las raíces así como el complejo proteico N-Zn.

**Hierro-fósforo:** excesivo suministro de P y un incremento en P/Fe inactiva al hierro. No hay una explicación clara y relacionada con una posible competencia del P con Fe en las raíces, la capacidad de la planta de absorber y mantener al hierro en una forma soluble y móvil disminuye conforme aumenta la concentración de P en el tejido. El fosfato de Fe precipita fuera y dentro de las raíces.

**Cobre-fósforo:** aplicaciones grandes y prolongadas resultan en una interacción del fósforo con el cobre. Se ha observado una disminución significativa en la concentración de Cu foliar cuando se incrementan las aplicaciones de P.

**Molibdeno-azufre:** la absorción de Mo es reducida por el S, esto se explica como una competencia directa entre dos aniones equivalentes del mismo tamaño, otra explicación sugiere la inhibición de la utilización de Mo cuando hay bajas concentraciones dentro de la planta.

**Zinc-magnesio:** un incremento en el pH del suelo, seguido del uso de  $MgCO_3$ , causa la interacción entre Zn y Mg dentro de la planta y en el suelo.

**Boro-calcio:** la toxicidad de boro puede ser aliviada por un incremento en la concentración de Ca. Las plantas crecen normalmente sólo cuando existe un cierto balance en la absorción de Ca y B, expresado en el peso equivalente de los dos elementos.

### **Interacciones con microelementos**

**Zinc-hierro:** la función metabólica del hierro en las plantas está relacionada en cierta forma con el suministro de Zn. El mecanismo todavía no es claro, una suposición es que la adición de Zn incrementa el crecimiento y esto conduce a una marcada disminución en la concentración de Fe en las plantas.

**Hierro-manganeso:** el Fe y el Mn están interrelacionados en sus funciones metabólicas, la efectividad de uno está determinada por la presencia del otro. La clorosis por Fe fue observada en diferentes cultivos cuando el suelo tenía grandes cantidades disponibles de Mn. Epstein y Stout sugirieron que el Mn interfería en el transporte de Fe desde las raíces hacia el tallo.

**Hierro-molibdeno:** se ha sugerido dos efectos del Mo y el Fe, uno benéfico y el otro no, el mecanismo no está claro. Se ha observado interacciones entre Fe-Mo y se ha sugerido que el Mo acentúa la deficiencia de Fe debido a la formación de un precipitado de Fe\_molibdato en las raíces. Se ha sugerido que el Mo interfiere en la reducción del Fe en la fase sólida. En otra situación, a concentraciones adecuadas o marginales de Mo, favorece la absorción de Fe y a concentraciones más altas deprimen la absorción de Fe.

**Cobre-hierro:** en muchos cultivos, principalmente en cítricos, la clorosis por Fe fue producida debido a una alta concentración de Cu en la solución nutritiva.

**Cobre-molibdeno:** se ha encontrado algunas evidencias de que el Cu interfiere con el rol del Mo en la reducción enzimática del nitrato ( $NO_3^-$ ). La deficiencia de uno es desarrollada por la alta aplicación del otro y un incremento de la tasa del antagonista reduce la toxicidad.

**Cobre-zinc:** se ha encontrado que el Zn induce la deficiencia de Cu en muchos cultivos.

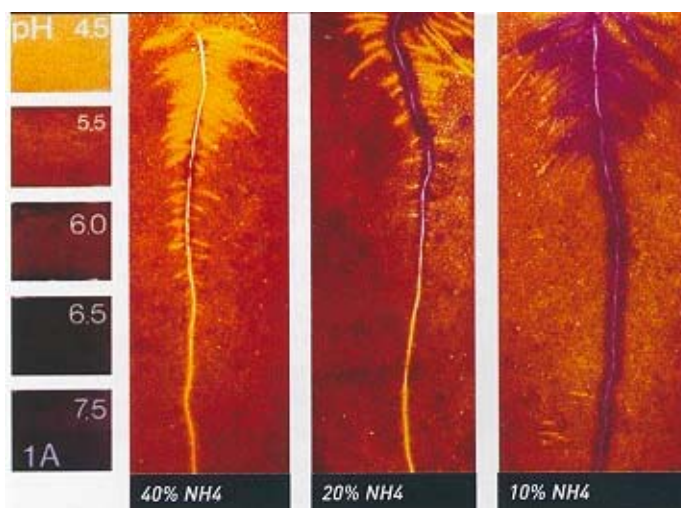
### **ESTRATEGIAS DE LA PLANTAS PARA SUPERAR LOS PROBLEMAS DE DISPONIBILIDAD**

En la naturaleza, las plantas que sufren problemas de disponibilidad han desarrollado diferentes mecanismos para superar esta situación y utilizar los micronutrientes y fósforo del suelo.

**Control del pH de la rizósfera:** muchos factores pueden afectar el cambio del pH de la rizósfera:

- El cambio en el pH de la raíz puede ser inducido por un desbalance en la relación de absorción catión/anión y corresponde con la diferencia en la liberación neta de  $H^+$  y  $HCO_3^-$  (u  $OH^-$ ). Las formas nitrogenadas tienen el efecto más prominente en la relación de absorción catión/anión y el pH de la rizósfera en especies anuales y perennes. El suministro de amonio puede causar una acidificación de la rizósfera que incrementará la solubilidad y absorción de microelementos, mientras que un suministro de nitratos resultará en una alcalinización de la rizósfera.
- La excreción de ácidos orgánicos pueden estimular la actividad microbiana por la liberación de carbono orgánico de las raíces y producción de  $CO_2$  por las raíces y microorganismos de la rizósfera. El  $CO_2$  disuelto en la solución suelo afecta el pH de la rizósfera.

- La capacidad buffer del suelo determinará el impacto de los cambios. La capacidad buffer depende principalmente del pH inicial del suelo y del contenido de materia orgánica.
- El estado nutricional de la planta tiene un efecto sobre el pH de la rizósfera.



Cambios en la rizósfera influenciados por diferentes formas de nitrógeno (Romhel y Marschner, 1983)

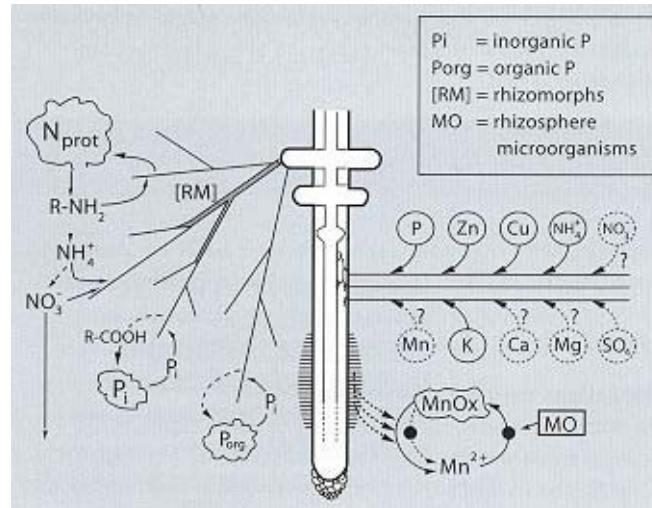
**Exudados radiculares:** los exudados están definidos por su peso molecular, los de bajo peso molecular (BPM, incluyen mucílago y ectoenzimas) y los de alto peso molecular (APM incluye ácidos orgánicos, azúcares, fenoles y aminoácidos)

En el grupo de los APM, el mucílago consiste de ácido poligalacturónico, el cual puede movilizar microelementos de la superficie del suelo arcilloso.

En el grupo de los BPM, los ácidos orgánicos, fenoles y aminoácidos, juegan un rol importante en la adquisición de microelementos del suelo. La importancia de los ácidos orgánicos es disminuir el pH de la rizósfera, quelación de microelementos y disminuir la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  por quelación y formación de sales solubles como citrato de calcio. Los principales ácidos involucrados son: ácido málico, citrato, fenólico, aminoácidos. La eficiencia de los exudados es afectada por la distribución de la población microbiana a lo largo del eje radicular.

**Especies de plantas que forman raíces proteoide:** el suministro de minerales puede afectar considerablemente el crecimiento, la morfología y distribución del sistema radicular en el suelo. Algunas especies de plantas forman racimos de raíces en respuesta a una deficiencia de microelementos y fósforo. La mejor estrategia de formación de racimos radiculares existe en las Proteaceae, aunque también existen en especies de Myricaceae, árboles de leguminosa y en leguminosas anuales. Las raíces proteoide son racimos denso de determinadas raíces laterales. Su estrategia es incrementar la superficie radicular e incrementar la excreción de ácidos orgánicos y fenólicos.

**Micorrizas:** muchas especies de plantas, incluidos muchos cultivos, tienen una micorriza endotrófica de la cual su micorriza vesículo-arbuscular (MVA) es el tipo predominante de una infección fúngica. El hongo tiene un micelio que penetra en la corteza de la raíz y están conectadas a un micelio externo en la rizósfera y el suelo. La absorción de microelementos se incrementa debido a que una pequeña hifa que pueden entrar a los poros del suelo es más pequeña que los pelos radiculares. El hongo incrementa la absorción de Co, Mo, Cu y Fe.



Dinámica de la absorción de nutrientes por raíces micorríticas (Marschner y Dell, 1994)

## LA SOLUCIÓN DE LA INDUSTRIA DE LOS FERTILIZANTES

### Solución quelatada

La industria de fertilizantes ha encontrado una solución a la disponibilidad de microelementos. En los pasados 20-25 años, ha sido reconocido que muchos de los microelementos necesarios para las plantas pueden ser suministrados por complejos especiales que contienen metales, referidos como “quelatos”.

Quelación se origina de la palabra griega *chelè* (tenaza de langosta). La quelación es el proceso de unión reversible, referido también como ligando, quelante, quelator o agente quelante a un ión metálico, formando un complejo metálico conocido como quelato. El término generalmente es reservado para complejos en los cuales el ión metálico está unido a dos o más átomos del agente quelatante, aunque los enlaces pueden ser de cualquier coordinación o enlaces iónicos. La conexión química está hecha por el ligando. El ligando es un átomo, ión o molécula que dona uno o más de sus electrones a través de un enlace covalente coordinado o comparte electrones a través de un enlace covalente con uno o más iones centrales.

El uso de sales inorgánicas (metal-sulfatos) no es una opción preferida en la agricultura intensiva, debido a que fácilmente forma compuestos insolubles que precipitan con iones inorgánicos como sulfato, fosfato, carbonato e hidróxido. Una vez que el ión metálico ha precipitado no estará disponible para la planta. La reacción puede llevarse a cabo en el tanque de la solución stock, antes de la fertirrigación y en los filtros. El quelato sirve como una protección del ión metálico que previene su reacción con el medio y lo mantiene altamente soluble en una forma que la planta lo pueda absorber. Existen muchas formas de quelatos y se diferencian unos de otros por su fuerza y capacidad de estabilizar y mantener el metal bajo diferentes condiciones (principalmente el pH).

### Quelatos, mecanismo de liberación del metal

Los quelatos sintéticos no penetran la raíz. Los metales dejan el quelato sobre la superficie de la raíz antes que las raíces los absorban. El ácido cítrico dentro de la planta es un quelato orgánico natural en el transporte de hierro y otros metales en la planta.

### Estabilidad del quelato

Existen varios factores que afectan la estabilidad del metal quelatado, algunos están relacionados a los iones metálicos, algunos al agente quelante y otros al ambiente. La estabilidad está expresada por la estabilidad constante. La estabilidad constante refleja la fuerza del quelato, altos valores para K significa una mayor estabilidad del metal quelado frente a uno no quelado. K es expresado en logaritmos (log).

### **Efecto de los iones metálicos**

- El tamaño de ión metálico: para iones metálicos de la misma familia y que tienen la misma carga, la estabilidad se incrementa conforme el tamaño del ión metálico disminuye. Las formas de calcio son más estables que las de estroncio.
- La carga del ión metálico: la estabilidad se incrementa con el incremento de la carga del ión metálico,  $\text{Fe}^{3+}$  es más estable que  $\text{Fe}^{2+}$ .
- La electronegatividad del ión metálico: la electronegatividad es la habilidad para atraer electrones en un enlace covalente. La estabilidad se incrementa conforme se incrementa la electronegatividad (eV):  $\text{Cu}$  (1.9) >  $\text{Fe}$  (1.8) >  $\text{Zn}$  (1.6) >  $\text{Mn}$  (1.5) >  $\text{Ca}$  (1.0).

### **Efectos de los agentes quelantes**

- El número de anillos incrementa la estabilidad.
- Donador de electrones. El Zn muestra mayor estabilidad que S > N > O, mientras que el Ca no muestra diferencias significativas con los tres anteriores.
- Estabilización por resonancia: este efecto es causado por compuestos orgánicos conocidos como compuestos aromáticos. En estos anillos aromáticos, los enlaces electrónicos están deslocalizados, por lo que los enlaces simples y dobles saltan de un átomo a otro continuamente, no existe polaridad y la estabilidad de compuesto aumenta. Los agentes quelantes que tienen más anillos aromáticos tienen mayor estabilidad.
- Efecto estérico: relacionado con la interferencia positiva y negativa en el espacio entre los átomos y los ligandos. Si los átomos están muy cerca entre sí, existe un costo asociado en energía debido al traslape de nubes de electrones y esto puede afectar la conformación y la reactividad. En conclusión, diferentes configuraciones tienen diferentes niveles de estabilidad.
- Entropía: en la naturaleza, las cosas tienen la tendencia a alcanzar el estado más estable de energía (estado estacionario). Cuando existe la energía libre (entalpía), los materiales son inestables, a más materiales estables mayor entropía. La entropía es un estado termodinámico o propiedad que mide el grado de desorden o azar. Cuando más positiva es la entropía, más negativa es la energía libre y K (constante de estabilidad) más positiva, mayor estabilidad del quelato. La formación del quelato produce más entropía positiva. La entropía está descrita por  $\Delta S$  (cal/°C) es usada para describir la estabilidad del EDTA (etilendiamintetraacetato) para diferentes metales (25°C):  $+55$  ( $\text{Cu}^{2+}$ ) =  $+55$  ( $\text{Zn}^{2+}$ ) >  $+42$  ( $\text{Cu}^{2+}$ ) >  $+41$  ( $\text{Mn}^{2+}$ ) >  $32$  ( $\text{Mg}^{2+}$ ).

### **Efectos del ambiente**

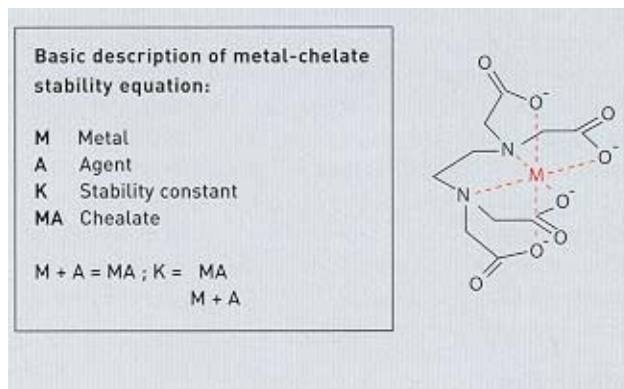
- Temperatura: el incremento de la temperatura disminuye la estabilidad constante.
- Punto dieléctrico: la estabilidad constante aumenta con la disminución de la constante dieléctrica del solvente.
- Fuerza iónica: la estabilidad constante disminuye con el incremento de la fuerza iónica.
- Complejos competidores: la presencia de complejos orgánicos que pueden competir con la quelación por la formación de complejos de alta estabilidad con los metales (ácidos policarboxílicos). En una solución, el metal tiene mayor estabilidad constante con el agente quelante.



- Efecto del pH: los iones hidrógeno pueden competir con los iones metálicos por el quelante donde la estabilidad del complejo metal es baja. A pH bajo, hay más iones hidrógeno presente en la solución y hay más posibilidades de intercambio con el metal. En el EDTA, el Fe y Cu tienen una estabilidad constante alta y se mantienen sin ser afectados a pH bajo. A pH alto (8-9) existen otros intercambios, principalmente con el calcio, a este pH el EDTA se vuelve muy débil y necesita ser reemplazado. La efectiva quelación en pH de 8-12 es alcanzada con el uso de tipos aminopolicarboxílicos.

### Formas de quelatos

Una de las formas más convenientes para describir la estabilidad de los diferentes quelatos es a través del diagrama de estabilidad. El diagrama describe el equilibrio entre el quelato con los diferentes metales en presencia a ciertos iones en la solución suelo que amenazan la estabilidad de la quelación. Para formar los diagramas, la concentración del catión fue determinada de acuerdo a las condiciones más comunes de suelos no alcalinos.



Quelación del metal en el EDTA

### EDTA, DTPA, CDTA EDDHA

Este grupo comparte una alta afinidad específica por el hierro (Fe) pero también por el calcio a ciertos pH. En referencia a la interferencia de la quelación del hierro con el incremento del pH, el orden de estabilidad decrece como sigue:



EL EDDHA tiene una alta selectividad por el  $\text{Fe}^{3+}$  sobre un rango amplio de 4 a 9, desafortunadamente sólo se forma el quelato con el hierro y no con otros microelementos esenciales.

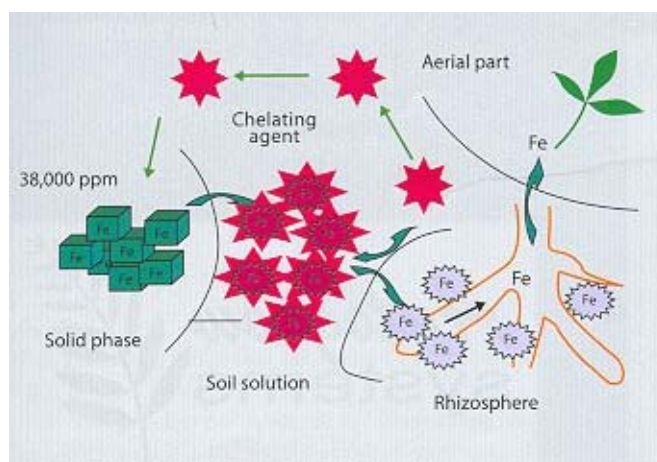
### HEDTA, NTA, EGTA, CIT y OX

Este grupo comparte una baja especificidad por el hierro ( $\text{Fe}^{3+}$ ) y baja estabilidad. Estos quelatos muestran alta afinidad al  $\text{Al}^3$  a pH bajo y al  $\text{Ca}^{2+}$  cuando aumenta el pH. En referencia a la interferencia de la quelación del hierro con el incremento del pH, el orden de estabilidad decrece como sigue:



Abreviación	Nombre	Fórmula
EDTA	Acido etilendiaminotetracético	$C_{10}H_{16}O_8N_2$
DTPA	Acido dietilentriaminopentacético	$C_{14}H_{23}O_{10}N_3$
CDTA	Acido ciclohexanodiaminotetracético	$C_{14}H_{22}O_8N_2$
EDDHA	Acido etilendiaminodi-Q-hidroxifenilacético	$C_{18}H_{20}O_6N_2$
HEDTA	Acido hidroxietilendiaminotriacético	$C_{10}H_{18}O_7N_2$
NTA	Acido nitrilotriacético	$C_6H_9O_6N$
EGTA	Acido etilenglico-bis-(2-aminoetileter)tetracético	$C_{14}H_{24}O_{10}N_2$
CIT	Acido cítrico	$C_6H_8O_7$
OX	Acido oxálico	$C_2H_2O_4$
$P_2O_7$	Acido pirofosfórico	$H_4P_2O_7$
$P_3O_{10}$	Acido trifosfórico	$H_5P_3O_{10}$

Hay que enfatizar que el suministro de micronutrientes a través de formas queladas es la forma correcta y confiable para asegurar la disponibilidad de estos elementos. Los quelatos no son la solución perfecta pero son más eficientes que el uso de las formas de metal sulfato.



Mecanismo de liberación del metal (Fe) desde el agente quelatante