

Los más recientes micronutrientes vegetales

Adriana Elina Ortega¹ y Eurípedes Malavolta²

Introducción

Los elementos que se encuentran en el sistema suelo-planta pueden ser: *i*) Esenciales: sin ellos la planta no vive; *ii*) Benéficos: con ellos aumenta el crecimiento y la producción en situaciones particulares o la tolerancia a condiciones desfavorables del medio (clima, plagas, enfermedades, compuestos tóxicos del suelo, del agua o del aire), pero la planta puede vivir sin ellos (i.e. Na, V); y *iii*) Tóxicos: con ellos disminuye su crecimiento y producción, pudiendo llegar a provocar la muerte (por ej. Al, Pb, Cr, Cd, Hg). Cabe aclarar que todo elemento es potencialmente tóxico en altas concentraciones. Los elementos categorizados como tóxicos, lo son inclusive a muy bajos tenores (Malavolta et al., 1997).

Un elemento es considerado esencial cuando cumple con uno o con los dos criterios de esencialidad establecidos por Arnon y Stout (1939): *i*) Directo: el elemento participa de algún compuesto vital o de alguna reacción crucial para la vida de la planta; y *ii*) Indirecto: en ausencia del elemento la planta no completa su ciclo de vida, muestra síntomas de carencia y muere, ya que no puede ser sustituido por ningún otro elemento. En general, cada uno de los elementos esenciales confirma los dos criterios de esencialidad (Malavolta, 1994; Malavolta et al., 1997).

Hace medio siglo atrás (1954) se conocían los siguientes nutrientes esenciales: carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S), boro (B), cloro (Cl), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), molibdeno (Mo) y zinc (Zn). Cobalto (Co), níquel (Ni), y selenio (Se) se han sumado a la lista recientemente. Por otra parte, hay indicios de que el silicio (Si) podría entrar en la lista de los micronutrientes, aunque sería más pertinente considerarlo como benéfico o cuasi-esencial (Epstein, 1999). El sodio (Na), como regla general, es considerado como benéfico, no obstante es esencial para algunas especies halófitas y posiblemente para plantas de metabolismo C4 (Tabla 1).

Los elementos esenciales se encuentran en distintas concentraciones en la materia seca, las cuales se reflejan en las cantidades exigidas, contenidas o agregadas de ellos. De acuerdo con esto, se los ha dividido en macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg y S) y micronutrientes (B, Cl, Cu, Mn, Fe, Zn, Co, Mo, Ni y Se). Así, un cultivo de soja que produce 3000 kg de granos y un peso de materia seca total de 8000 kg ha⁻¹, metaboliza 3500 kg de C, 450 kg de H, 3300 kg de O₂, 600 kg de macronutrientes y 13 kg de micronutrientes (Malavolta et al., 1997).

Funciones de los nuevos micronutrientes

Al igual que otros nutrientes esenciales, esta serie de elementos más recientemente descrita, ejerce funciones específicas en la vida de las plantas (Tabla 2).

Cobalto (Co)

El Co era un elemento ampliamente reconocido como beneficioso y aplicado en agricultura en diversos cultivos, junto con el Mo. El Co es esencial para fijadores libres y simbióticos en el proceso de fijación biológica de N atmosférico. En la vida de las plantas superiores es considerado un nutrimento porque interviene en el metabolismo de los carbohidratos y de las proteínas por su participación en diversos sistemas enzimáticos (Malavolta et al., 1997, USDA 2001, FAO 2005). El Co es absorbido como Co²⁺ y es transportado por el flujo transpiratorio, por lo cual tiende a acumularse en los márgenes y puntas de las hojas. Cuando se absorbe vía foliar, es prácticamente inmóvil y tiende a formar quelatos de igual forma que sucede con Cu, Fe, Mn y Zn.

El tenor en la materia seca vegetal está normalmente entre 0.02 y 0.05 mg kg⁻¹ (ppm). Algunas especies acumulan Co, sin manifestar toxicidad, hasta valores centenas de veces mayores: i.e. *Niza sylvatica* presenta hasta 1000 mg kg⁻¹, *Crotalaria* cobalticola tiene entre

Tabla 1. Descubrimiento de la esencialidad de los micronutrientes en plantas superiores (Brownell, 1965; Delwiche et al., 1961; Epstein, 1999; Eskew et al., 1983; Marschner, 1986; Wen y Chen, 1988).

Elemento	Referencia
Fe	Sachs, 1860
Mn	McHague, 1922
B	Warington, 1923
Zn	Sommer y Lipman, 1926
Cu	Lipman y MacKinney, 1931
Mo	Arnon y Scout, 1938
Cl	Broyer et al., 1954
Co	Delwiche et al., 1961
Ni	Eskew et al., 1983
Se	Wen y Chen, 1988
Na*	Brownell, 1965
Si**	Epstein, 1999

* Esencial para especies halófitas y, posiblemente, de metabolismo C4.
** Benéfico o cuasi-esencial.

¹ INTA EEA Salta, CC 228 - 4400 Salta, Argentina. Correo electrónico: aortega@correo.inta.gov.ar

² CENA, Piracicaba, Brasil

Tabla 2. Funciones y procesos en los que actúan los elementos Co, Ni, Se, Na, y Si, y su participación en la producción de cultivos (Ferreira et al., 2001; Malavolta, 1994; Malavolta et al., 1997; Marschner, 1986; Mengel y Kirkby, 2000; UC SAREP, 2003).

Elemento	Función estructural	Función enzimática	Función metabólica	Efectos
Co	Vitamina B12 y derivados importantes en la síntesis de la Leghemoglobina	Deshidratasas Mutasas Fosforilasas Transferasas	FBN Regulación hormonal (ABA, Etileno) Metabolismo de carbohidratos y proteínas Síntesis de clorofila	Favorece la FBN Mayor formación de raíces
Ni	-	Ureasa	Metabolismo del N	Hidrólisis de la urea Favorece el crecimiento
Se	ARN mensajero	Actividad hidrogenasa	Síntesis proteica FBN	Favorece el crecimiento y la fructificación
Si	Pared celular (SiO ₂ hidratada)	-	Síntesis de lignina	Disminuye la toxicidad por Mn, Fe y Al. Aumenta la resistencia a enfermedades. Aumento de rendimiento y calidad
Na	-	-	Control hormonal (Citoquininas) Síntesis de clorofila (en plantas C4)	Sustituye en parte al K (propiedades osmóticas) Expansión celular Favorece la fotosíntesis y el balance de agua. Aumento de rendimiento y calidad

FBN: Fijación biológica del nitrógeno.

500 y 800 mg kg⁻¹. Tales plantas pueden servir como indicadores de la presencia de minerales ricos en Co.

En el caso de los cultivos de leguminosas que forman nódulos con bacterias de los géneros *Rhizobium* o *Bradyrhizobium*, se lo aplica en dosis muy pequeñas del orden de g ha⁻¹, principalmente junto con la inoculación de las semillas y/o en aspersiones foliares. En algunos lugares de Brasil, es posible que la respuesta a la aplicación de P se relacione a la presencia de Co y Mo como contaminantes de los fertilizantes fosfatados (Tabla 8). Experiencias en el cultivo de poroto (*Phaseolus vulgaris*), observaron respuestas en rendimiento similares agregando P, a razón de 200 kg P₂O₅ ha⁻¹ como superfosfato simple (SPS; 0-23-0), ó agregando Co+Mo a razón 0.25g + 13 g ha⁻¹: Testigo 583 kg ha⁻¹, con P 1526 kg ha⁻¹, y aplicando Co + Mo 1532 kg ha⁻¹ (Malavolta, 1994).

Por otra parte, se ha estudiado que la aplicación foliar de una solución que contiene 1000 mg l⁻¹ de sulfato de Co antes de la diferenciación de los botones florales del mango, reduce la malformación de flores entre 84 y 94%. También, los sulfatos de Cd y de Ni tienen efecto semejante pero menos acentuado. La mal formación floral es caracterizada por la deformación de las panículas, supresión de la dominancia apical, acortamiento de los ejes primarios y secundarios y preponderancia de flores grandes y estaminadas. El

tratamiento aumenta el tamaño y el peso de los frutos y la producción. En concentraciones muy bajas aumenta la duración de las rosas cortadas, reduciendo la formación de etileno que acelera la senescencia (Malavolta et al., 1997).

Níquel (Ni)

El Ni fue considerado comúnmente un elemento tóxico para las plantas superiores. Sin embargo, estimula la germinación y el crecimiento de varios cultivos, además de ser esencial para un gran número de bacterias, como componente metálico de las enzimas ureasa y de muchas hidrogenasas. Las aplicaciones foliares con sales de Ni son muy efectivas para combatir la roya de los cereales por su toxicidad para el patógeno y por la resistencia que otorga en el hospedero (Malavolta y Moraes, 2005). Actualmente, existe evidencia que el Ni sostiene la función de la enzima ureasa (cataliza la hidrólisis de la urea) de plantas superiores, y es requerido por leguminosas (Eskew et al., 1983; 1984) y no leguminosas (Brown et al., 1987; Hernández Gil, 2002). El Co puede remplazarlo en la ureasa de las hojas de pepino pero con una menor actividad específica. Por lo expresado anteriormente, Marschner (1995) considera al Ni un elemento esencial para las plantas superiores. Es absorbido como Ni⁺⁺, y es transportado por el xilema como complejos o quelatos orgánicos

aniónicos. Presenta una capacidad intermedia de redistribución en la planta; en el suelo su movilidad es media en condiciones de oxidación, elevada en ambiente ácido y muy baja en ambiente neutro a alcalino y reductor (Malavolta et al., 1997).

Fue descubierto recientemente que el síntoma de "oreja de ratón" del pecan se debía a la deficiencia de Ni. Su concentración en la hojas con carencia era de 0.4 - 0.5 mg Ni kg⁻¹ (suelos con 0.4-1.4 kg Ni ha⁻¹) y en hojas tratadas con ausencia de síntomas, de 7-26 mg Ni kg⁻¹. Las deficiencias de Ni se revierten con 1-2 pulverizaciones foliares en primavera con fertilizantes (10-100 mg Ni l⁻¹ + urea + surfactante) o con extracto acuoso de *Alyssum murale*, un hiperacumulador (Wood et al., 2004 a, b, c; Wood et al., 2006).

De un modo general, el tenor de Ni adecuado es de 1.5 mg kg⁻¹. Los tenores generalmente encontrados están entre 0.05-5 mg kg⁻¹, encontrándose las mayores concentraciones en flores y frutos. Los síntomas de toxicidad aparecen cuando están entre 25-50 mg kg⁻¹ del peso seco en las plantas. Sin embargo, la vegetación nativa de suelos de serpentina (con altos contenidos de silicatos de Mg) acumula cantidades muy grandes de Ni, llegando a valores de 19 000 mg kg⁻¹ (Malavolta et al., 1997; Malavolta y Moraes, 2005).

Selenio (Se)

El Se posee un efecto estimulante en bajas concentraciones, sustituye al S de la ferredoxina de algunas plantas y es necesario para la actividad de la nitrato reductasa de *Escherichia coli*. El Se fue encontrado en el ARN mensajero de muchas especies vegetales, lo que indica su participación en la síntesis de proteínas y lo convierte en esencial para plantas superiores (Wen et al., 1988). A partir de este trabajo, Malavolta (1994) lo considera un nutriente vegetal. El Se ingresa al vegetal como seleniato (SeO₄⁻²) o selenito (SeO₃⁻²). Las propiedades químicas del Se son muy parecidas a las del S. El seleniato y el sulfato compiten por los mismos sitios de absorción en las raíces. Es incorporado en aminoácidos análogos a los que contienen S (selenocisteína, selenometionina).

Es más común encontrar referencias de toxicidad de Se que de deficiencia en vegetales. Hay mucha variación en la capacidad de las especies para absorber el elemento y se da en el siguiente orden creciente: crucíferas, forrajeras gramíneas, leguminosas, cereales. Se distinguen dos categorías: *i)* Plantas con tolerancia limitada, en las cuales el tenor no pasa de 5 mg kg⁻¹ (gramíneas forrajeras, leguminosas); y *ii)* Plantas que acumulan hasta 10 veces más sin consecuencias negativas (cereales). Las seleníferas *Astragalus bisulcatus* y *A. pectinatus* acumulan millares de mg kg⁻¹ sin mostrar efectos tóxicos (Malavolta et al., 1997).

Silicio (Si)

El carácter benéfico del Si es atribuido, principalmente, por el aumento en la resistencia de enfermedades en plantas acumuladoras de este elemento -se localiza en la pared celular o cerca de la misma dificultando la penetración del agente patógeno- y por la disminución del efecto tóxico del exceso de Mn, Fe y Al en suelos ácidos. La esencialidad del Si fue demostrada para algunos cultivos por el criterio indirecto: en su falta diversas especies (tomate, pepino) no completan su ciclo y antes de morir muestran síntomas de deficiencia (Takahashi y Miyake, 1977 citado en Marschner, 1986; y Malavolta, 1997). En general, parece más adecuado considerarlo benéfico o cuasi-esencial (Epstein, 1999).

Es absorbido como ácido monosilícico (H₄SiO₄) no disociado en un proceso activo, parecería que es sensible a la temperatura y a los inhibidores metabólicos. La savia bruta del arroz tiene una concentración cien veces mayor que la solución radical en forma de ácido monosilícico. La mayor proporción del Si en la planta se encuentra como sílice amorfa hidratada (SiO₂·nH₂O). En ciertas especies, particularmente de gramíneas, es común la presencia de cuerpos silicosos insolubles. Después de solidificado se vuelve inmóvil en la planta: en las células epidérmicas del arroz, debajo de la cutícula, aparece una capa de sílica, que ayudaría a limitar la pérdida de agua por transpiración y dificultar la penetración de hifas de los hongos. En las dicotiledóneas esa capa no aparece (Malavolta, 1997).

Las plantas cultivadas difieren mucho en la capacidad de absorber el Si. Marschner (1986) las divide en tres grupos según su contenido de SiO₂ en orden decreciente: *i)* Gramíneas de tierras inundadas como el arroz, *ii)* Gramíneas de tierra seca como caña de azúcar y la mayoría de los cereales, y *iii)* La mayoría de las dicotiledóneas, especialmente las leguminosas.

Los efectos reconocidos de Si incluyen (Malavolta et al., 1997; Ferreira, 2001; Fancelli, 2005; UC SAREP, 2006):

i) Resistencia a las enfermedades y plagas en hojas y raíces: La resistencia del arroz a los hongos *Helminthosporium oryzae* y *Pyricularia oryzae* se aumenta con una elevación del tenor de Si en la planta hasta un cierto punto. En suelos pobres en Si disponible (5 mg dm⁻³ de Si en ácido acético diluido), la adición de silicato disminuye la severidad de las enfermedades causadas por *Bipolares oryzae* y *Pyricularia grises*, y aumenta los rendimientos. La adición de silicato de K a la solución nutritiva aumentó la actividad de la quitinasa del pepino y aún más la de las peroxidases y polifenoloxidasas, aumentando la resistencia a *Pythium spp.* Algunos fenoles extraídos de plantas tratadas con Si mostraron acción fungistática contra *Pythium* y *Cladosporium cucumerinum*. Mejora el uso del agua en el poroto y reduce la

incidencia de *Fusarium spp.* La adición de silicato a la solución nutritiva en instalaciones comerciales para la producción de pepino en el Canadá es realizada rutinariamente para ayudar a controlar el mildiu.

ii) **Elementos en solución edáfica:** Hay un aumento en la disponibilidad de P en el suelo. Podría ser porque el silicato lo desorbe de los sitios de adsorción (o los ocupa preferencialmente) en la arcilla y en los sesquióxidos, o porque disminuye la actividad de los iones Al^{3+} en solución, evitando que estos precipiten el $H_2PO_4^-$. Disminuye la intoxicación con Al, Fe y Mn en suelos ácidos. Aumenta la disponibilidad de Zn en altas concentraciones de P y bajas de Zn. Aumenta el crecimiento de raíces de las plantas que crecen con bajas concentraciones de Ca.

iii) **Aumento de rendimiento y/o calidad:** El arroz, con la aplicación de Si en suelos orgánicos, manifiesta un aumento en la eficiencia del uso del agua y en la producción de granos, en la concentración de este elemento en hojas y en la resistencia a las enfermedades y al vuelco (Yoshita, 1980; Zinder et al., 1986; citados en Ferreira et al., 2001). En caña de azúcar, la aplicación de silicato en suelos pobres en Si disponible aumentó el rendimiento y la concentración de sacarosa, y en algunos casos, los aumentos de producción de azúcar fueron muy elevados (Fox et al., 1967; citado en Ferreira et al., 2001). En colza o canola (*Brassica napus*) fue observada una interacción positiva entre Si y B: la adición de Si aumentó la materia seca de la raíz y de la parte aérea cuando era bajo el contenido de B, pareciendo estimular la absorción y el transporte de B en esas condiciones y aumentando también la fotosíntesis.

Sodio (Na)

El Na es un elemento benéfico para las plantas superiores porque puede sustituir parcialmente al K en funciones no específicas, contribuyendo a la generación de potencial osmótico y turgencia celular, cuando el suelo es pobre en este elemento (Malavolta et al., 1997). Los cultivos poseen diferentes capacidades de sustitución de K por Na en la producción (Figura 1) y además, generalmente tienen una absorción preferencial para el K. Es un elemento esencial, por el criterio indirecto, para la halófito *Atriplex vesicaria* (familia *Chenopodiaceae*) y para especies, generalmente gramíneas, que hacen la fotosíntesis vía C4, pero no para las plantas C3 (Brownell, 1979). Es considerado un micronutriente, aún para halófitas extremas (Flowers et al., 1977; citado en Marschner, 1986).

El Na es absorbido activamente como ión Na^+ . Las plantas con síntomas severos de deficiencia se recuperan rápidamente, una semana después de recibir Na en solución nutritiva. La respuesta al Na depende del mayor o menor transporte del mismo hacia la

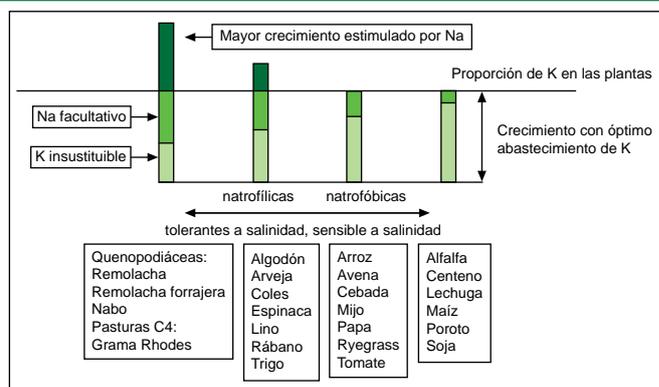


Figura 1. Esquema tentativo de clasificación de los cultivos de acuerdo con la capacidad de sustitución de K^+ por Na^+ (Ferreira et al., 2001; Malavolta, 1994; Malavolta et al., 1997; Marschner, 1986; Mengel y Kirkby, 2000; UC SAREP, 2003).

parte aérea. Maíz y poroto, en los cuales el transporte es mínimo, no responden a la fertilización con Na en la misma escala en que lo hacen plantas como la remolacha, en las cuales el movimiento es sustancial. Las plantas que no recibieron salitre de Chile ($NaNO_3$) como fuente de N muestran 0.6 g Na kg^{-1} en las hojas, en cuanto las fertilizadas presentaron 0.9 g Na kg^{-1} , un aumento de 50%, indicando transporte de Na hacia la parte aérea (Malavolta et al., 1997). Algunas especies que fijan el CO_2 vía C4, responden positivamente al agregado de Na. Por ej., ciertas variedades de caña de azúcar (C4) cuentan con la capacidad de sustitución parcial del K por Na: la SP71-6163 y 70-1284, en cuanto otras variedades como SP 71-1406 no cuentan con esta capacidad (Malavolta et al., 1997).

Deficiencias y toxicidades

La planta selecciona limitadamente en cantidad y calidad los elementos que absorbe, es así que su composición refleja las condiciones medias. Que un elemento sea deficiente o excesivo depende de su disponibilidad y/o interferencias en el lugar de desarrollo (Tabla 3).

Existen, además, diferencias entre las plantas en cuanto a la sensibilidad a la escasez o exceso de un nutriente (plantas indicadoras), a sus tolerancias a excesos o a la acumulación de los mismos. A modo de referencia, en la Tabla 4, se presentan concentraciones críticas en planta para el diagnóstico de deficiencia y toxicidad en los principales cultivos.

Las deficiencias de nutrientes ocasionan síntomas característicos en los vegetales (Tabla 5). Estos se deben a la imposibilidad de la planta de cumplir normalmente con funciones fisiológicas en la que interviene el elemento y que posteriormente afectan las características morfológicas. El diagnóstico por síntomas visuales facilita una rápida recomendación, pero se debe tener en cuenta que cuando los síntomas son visibles ya ha ocurrido en el vegetal una disminución considerable de la producción. Elementos diferentes

Tabla 3. Factores que contribuyen a la deficiencia de micronutrientes (Mengel y Kirkby, 2000; Malavolta y Moraes, 2005).

Factores	Co	Ni	Se	Si	Na
Textura	Arenosa	-	-	-	-
pH	Neutro, alcalino o muy ácido	> 6.5	Ácido y neutro	> 7	Muy ácido
Materia orgánica	Alta	-	Alta	Alta	-
Régimen de humedad	Alta humedad	Sequía	Anegamiento	-	Alta
Otros factores	Libre de CaCO ₃ Alto Fe y Mn Suelos excesivamente cultivados	Encalado excesivo, alto Zn, Mg, P y Cu, dosis altas o tardías N. Ataque de nemátodos	Alto óxidos de Fe y SO ₄ ⁼	Encalado Alto Fe y Al	-
Valores críticos en suelos (mg kg ⁻¹)	0.02-0.3	0.10-0.40	0.04	5.00 (pobre)	-
Cultivos con respuesta más frecuente	Legumbres, mango, rosa	Cereales, haba, papa, nuez pecán, soja	-	Arroz, caña de azúcar, pepino, tomate	<i>Atriplex vesicaria</i> , Plantas C4

pueden ocasionar síntomas similares y estos varían con el momento de aparición de la deficiencia, su severidad y la interacción con otras deficiencias.

Cuando se intenta diagnosticar la causa de una deficiencia o toxicidad nutricional es necesario complementar las observaciones con análisis de planta y suelo debido a la interacción que existe entre los nutrientes. El exceso o deficiencia de un elemento puede interferir en la absorción en cantidades adecuadas de otros (Tabla 6).

Fuentes de los nuevos micronutrientes

Las deficiencias se pueden solucionar agregando estos nutrientes a través de fertilizantes y/o enmiendas (Tablas 7 y 8). Una o dos aplicaciones foliares pueden ser suficientes para corregir las deficiencias y lograr un desarrollo normal. Hay que tener en cuenta que, por las pequeñas cantidades requeridas de los micronutrientes, los tenores que se presentan en los fertilizantes o enmiendas de uso masivo, pueden ser suficientes. También existen algunas alternativas de utilización de desechos animales y residuos, que se encuentran en proceso de evaluación (Tabla 8).

Consideraciones Finales

- La lista de elementos esenciales para las plantas superiores está constituida por: C, H, O, N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cl, Cu, Fe, Mn, Mo, Zn, Co, Ni y Se. Ha sido incrementada en tres nutrientes de los que se conocían hace medio siglo atrás: Co, Ni y Se.
- El Si debería considerarse como benéfico.
- El Na, como regla general, es considerado como benéfico, no obstante es esencial para las halófitas y posiblemente para las plantas C4.
- En general, los requerimientos de Co y Ni son del mismo orden que los de Mo que deben mantenerse

en una concentración alrededor de 0.05 mg kg⁻¹ de materia seca; los de Se son similares a los del Cu de 5-20 mg kg⁻¹ de materia seca; y los de Si y Na a los del S de 2-6 g kg⁻¹ de materia seca.

- En Argentina, el Co se ha trabajado mucho con las leguminosas en rizobiología y ya lo poseen incorporado muchos inoculantes. Hay grupos de trabajo (Ratto, 2005; Vázquez, 2006) que ya están realizando determinaciones de Co y Ni en suelos y vegetales.
- Con respecto al Na, se han utilizado fertilizaciones en tomate en cultivos de primicia de noroeste argentino con relativo éxito para incrementar el sabor y rendimiento.
- En Si, en la EEA Salta se realizan actualmente estudios en fertilización de almácigos flotantes de tabaco como prevención al ataque de *Phytophthora*.
- No se encuentra en el país, oferta de fertilizantes comerciales con Si, Se o Ni, aunque han aparecido las tierras de diatomeas con composición principalmente alta de Si y que contiene a los otros elementos en más bajas concentraciones. Para el Na, se dispone del uso de sal común (NaCl).
- La ciencia ha avanzado y puso en evidencia que existen otros micronutrientes, con estudios de difusión inicial en Argentina y en el mundo, que cobran importancia para los cultivos e indirectamente para la salud de los animales y humanos. Ponerlos en consideración a estudiosos de nutrición vegetal hace que estemos atentos para pensar en soluciones a diversos problemas, presentes o que se pudieran presentar, que todavía no han tenido respuesta.
- ¿Podrían los cultivos responder a los agregados de los elementos esenciales descubiertos más recientemente? Hay mucho por hacer todavía.

Tabla 4. Concentraciones de suficiencia y toxicidad en planta de los nuevos micronutrientes para diferentes cultivos (Chapman, 1966; Malavolta, 1994; Marschner, 1986; Malavolta et al., 1997; Ratto, 2005).

Cultivo (Nombre científico)	Parte analizada	Co	Ni	Se	Si	Na
		----- mg kg ⁻¹ -----			----- g kg ⁻¹ -----	
Alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)	Parte aérea madura	0.02-0.24	1.0-4.0	-	-	2.42
	Brotos superiores en prefloración	0.04-0.29	-	-	-	-
	Parte aérea con toxicidad	-	-	-	-	> 8
Algodón (<i>Gossypium spp.</i>)	Hojas	-	-	-	-	1.61-2.3
	Hojas toxicidad	-	-	-	-	9.4-27.1
Arroz (<i>Oryza sativa</i>)	Hojas + rastrojo	-	-	-	40-125	-
	Cáscara	-	-	-	80	-
	Granos	0.006	0.02	-	1	-
	Hojas con toxicidad	-	-	-	-	3.22
Arveja (<i>Pisum sativum</i>)	Granos maduros	-	2.0	-	-	-
Avena (<i>Avena sativa</i>)	Parte aérea prefloración	0.03	-	-	-	-
	Tallos maduros	0.05	-	-	-	-
	Granos	0.02	0.45	-	-	-
	Parte aérea prematura	0.04-0.45	7.0	-	-	-
	Lamina foliar	-	-	-	-	0.23-3
	Lamina foliar toxicidad	-	-	-	-	11.5-25
Banano (<i>Musa spp.</i>)	Brotos superiores en maduración	0.50	-	-	-	-
Bromus (<i>Bromus spp.</i>)	Parte aérea prefloración	0.08	-	-	-	-
Café (<i>Coffea spp.</i>)	Cerezas maduras	0.002	0.40	-	-	-
Caña de azúcar (<i>Saccharum officinarum</i>)	Parte aérea	-	-	-	10-30	-
	Bagazo	-	-	-	4.1	-
	Hojas	0.50-1.75	-	-	15.5	1.30-1.40*
Cebada (<i>Hordeum vulgare</i>)	Hojas inmaduras	0.20-0.30	-	-	-	0.9-1.6
	Parte aérea	0.24	-	-	-	-
	Hojas toxicidad	-	-	-	-	> 8
Centeno (<i>Secale cereale</i>)	Parte aérea forrajera	0.7	-	-	-	-
Durazno (<i>Prunus persica</i>)	Hojas	-	-	-	-	0.70-1.70*
	Frutos	-	-	-	-	0.30-0.80*
	Hojas toxicidad	-	-	-	-	6.2-10
	Raíces	-	-	-	-	0.023-1.2
	Raíces toxicidad	-	-	-	-	9.43
Espinaca (<i>Spinacea oleracea</i>)	Parte aérea comestible	0.07-0.67	2.4	3.15	-	-
Festuca (<i>Festuca elatior</i>)	Parte aérea prefloración	0.09	-	-	-	-
Frutilla (<i>Fragaria spp.</i>)	Hojas	-	-	-	-	0.04-1.15
	Hojas toxicidad	-	-	-	-	> 4.5
Lechuga (<i>Lactuca sativa</i>)	Parte aérea comestible	0.20-0.21	-	-	-	-
	Parte aérea madura	6.25	-	-	-	-
	Cabeza madura	0.07	-	-	-	-
Limón (<i>Citrus limon</i>)	Hojas	-	-	-	-	0.46
	Hojas toxicidad	-	-	-	-	2.3
Maíz (<i>Zea mays</i>)	Muestreo foliar	-	0.45-2.00	23	-	0.10-0.90*
	Mazorcas	0.01	-	-	-	-
	Hojas + rastrojo	-	-	-	6.7	-
	Planta	-	-	-	2.8	0.20-0.30*
	Granos	0.01	0.14-2.0	-	1.0-5.14	-
	Raíces	-	-	-	-	0.360-0.70*
	Parte aérea	0.04	-	-	-	0.50-1.00*

Tabla 4. Continuación... Concentraciones de suficiencia y toxicidad en planta de los nuevos micronutrientes para diferentes cultivos.

Cultivo (Nombre científico)	Parte analizada	Co	Ni	Se	Si	Na
		----- mg kg ⁻¹ -----			----- g kg ⁻¹ -----	
Naranja (<i>Citrus sinensis</i>)	Frutos	0.003	-	-	-	0.043
	Hojas	-	-	-	-	1.61-3
	Hojas toxicidad	-	-	-	-	2.5-5.75
	Raíces activas de 6 a 12 meses	-	-	-	-	2.3-3.5
	Raíces activas de 6 a 12 meses toxicidad	-	-	-	-	6.67
Papa (<i>Solanum tuberosum</i>)	Tubérculos maduros	0.06-2.00	0.08-0.37	-	-	-
Peral (<i>Pyrus communis</i>)	Frutos maduros	0.18	1.3	-	-	-
Pomelo (<i>Citrus paradisi</i>)	Hojas de 4 a 12 meses sin fruto	-	-	-	-	1.38-1.61
	Hojas , toxicidas	-	-	-	-	2.76-4.83
Poroto (<i>Phaseolus spp.</i>)	Planta	-	-	5	0.45	-
	Parte aérea	-	-	-	-	0.2-0.3
	Raíz	-	-	-	-	0.3-0.7
	Granos	0.10	0.59	-	-	-
	Chaucha	0.02-0.26	-	-	-	-
	Brotos superiores	1.12	-	-	-	-
	Hojas	-	-	-	-	0.2
	Hojas, toxicidad	-	-	-	-	> 0.4
Rye grass (<i>Lolium multiflorum</i>)	Parte aérea madura	0.07	-	-	-	-
	Parte aérea prefloración	0.03-0.07	-	-	-	-
Soja (<i>Glycine max</i>)	Brotos superiores	0.12	-	-	-	-
	Granos	0.20	3.9	-	-	-
	Muestreo foliar	-	-	-	-	1.40-1.70*
	Parte Aérea	0.12	-	-	-	0.7-1.70*
Sorgo (<i>Sorghum vulgare</i>)	Parte aérea toxicidad	-	-	130	-	-
Tabaco (<i>Nicotiana tabacum</i>)	Hojas	-	-	-	-	0.20-0.50* a 1.74-3.20
	Tallo	-	-	-	-	0.50-1.20* a 1.2-3.30
	Raíz	-	-	-	-	0.80-1.70* a 1.2-2.80
	Parte aérea	-	-	-	-	2.90-3.30*
	Raíz	-	-	-	-	2.50-4.20*
	Muestreo foliar	-	-	-	-	2.20-2.60*
Tomate (<i>Lycopersicon esculentum</i>)	Frutos	0.005-0.25	0.01-0.15	-	-	-
	Brote superiores	4	-	-	-	0.13-4.7
	Hojas toxicidad	-	-	191	-	3.8-34.5
Trébol blanco (<i>Trifolium repens</i>)	Parte aérea madura	4.6	-	-	-	-
	Parte aérea floración	0.17-0.20	-	-	-	-
Trébol rojo (<i>Trifolium pratense</i>)	Parte aérea maduros	0.19	1.9	-	-	-
	Parte aérea floración	0.13-0.21	-	-	-	-
Trigo (<i>Triticum aestivum</i>)	Hojas inmaduras	0.13-1.40	-	-	-	-
	Hojas tóxicidad	-	14-46	-	-	17
	Granos	0.01	0.35-4.0	-	-	-
	Parte aérea forrajera	0.14	-	< 15	-	-
	Parte aérea prefloración	0.03	-	-	-	-
	Parte aérea toxicidad	-	-	450-1350	-	-
Vicia (<i>Vicia spp.</i>)*	Parte aérea en plena floración	0.13	-	-	-	-

* Ortega (inédito).

Tabla 5. Síntomas de deficiencia y toxicidad de Co, Ni, Se, Si y Na (Chapman, 1966; Marschner, 1986; Malavolta, 1994; Malavolta et al., 1997; Ferreira et al., 2001; Valdiviezo Freire et al., 2005).

Elemento	Deficiencia	Toxicidad
Co	Leguminosas: Deficiencia de N y/o poca nodulación. Deformidad de flores de mango.	Hojas con clorosis internerval, cloróticas enteras, después se secan y necrosan (deficiencia de Fe y Mn). Puntas de las raíces dañadas.
Ni	Soja: Necrosis en la punta de los folíolos (acumulación de urea 25 g kg ⁻¹). Centeno, trigo y avena: Acumulación de urea en las hojas, deficiencia de N y atraso en la maduración. Nuez Pecan: Punta de las hojas nuevas quedan redondeados y con puntos oscuros y el limbo se encorva hacia abajo. ("oreja de ratón") (acumulación de urea). Tomate: Clorosis de hojas jóvenes y necrosis de meristemas.	Disminución del crecimiento de parte aérea y raíces. Deformaciones de varias parte de las plantas y manchas en hojas y frutos. Dicotiledóneas: Clorosis internerval parecida a la deficiencia de Fe/Mn Gramíneas: Clorosis a lo largo de las nervaduras, pudiendo toda la hoja quedar blanquecida y mostrar necrosis en los márgenes. Raíces pardas y cortas.
Se	-	Atraso en el crecimiento, disminución en el tamaño, clorosis blanca en los márgenes de las hojas. Forrajes: Huelen a ajo.
Si	Tomate y pepino: Después de floración hay crecimiento retardado, malformación en hojas nuevas, clorosis internerval de las hojas maduras, polinización despereja. Las hojas y la la planta se marchitan con tasas transpiratorias altas. Arroz: Menor resistencia a enfermedades y vuelco, menor producción y crecimiento vegetativo. Necrosis en hojas maduras y marchitamiento de la planta. Caña de azúcar: Menor concentración de azúcar y manchas pardas en las hojas ("freckling") y en las partes más iluminadas del limbo hay manchas color plata (tal vez por exceso de Mn), senescencia prematura y escasa bortación.	-
Na	Atriplez vesicaria (halófito chenopodiaceae): Hojas cloróticas y después muestran manchas necróticas en las puntas y a lo largo de los márgenes; el crecimiento cesa y las plantas mueren. Clorosis leve por menor contenido de clorofila en algunas plantas C4.	Manchas necróticas en los márgenes, puntas o zonas internervales de las hojas.

Tabla 6. Interacción de nutrimentos en la zona radical y dentro de la planta (Kabata-Pendías y Pendías, 1985; Marschner, 1986; Malavolta, 1994; Malavolta et al., 1997; Ortega, 2002).

		En la rizósfera																		
		NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Zn	B	Mo	Mn	Fe	Cl	Co	Ni	Se	Si	Na
Dentro de la planta	NO ₃ ⁻				S	S	S		S	S		S	S	S	A					
	NH ₄ ⁺			S	A				A	+/-								A		
	P					A			A	A	A	S			A			A	A	+/-
	K						A													
	Ca							A		A	A	A			A	A		A	A	
	Mg										A			S						
	S												A			A				A
	Cu	+/-		+/-		+/-					A		A	A	A			A		
	Zn				A		+/-	+/-		A				A	A			A		
	B	+/-		+/-		A	A	A												+/-
	Mo	S		+/-		A			A	A	A	+/-			A	A				
	Mn			+/-		A	+/-	A		+/-	A	+/-	+/-		A			A	A	A
	Fe	S		+/-			A		+/-	A	A	+/-	A	A			A	+/-		A
	Cl																			
	Co						A								A	A				
	Ni				A					+/-	+/-				PA			R		
Se								R	A	A				A						
Si											+/-	S	+/-							
Na					R															

S = Sinergismo; A = Antagonismo; R = Reemplazo; +/- = Sinergismo/antagonismo; PA = Posible antagonismo.

Tabla 7. Principales fuentes de micronutrientes (Malavolta, 1994; UC SAREP 2003).

Elemento	Producto	Fórmula química	Concentración (%)
Co	Cloruro de cobalto	CoCl ₂ •2H ₂ O	35
	Sulfato de cobalto	CoSO ₄ •7H ₂ O	22
Na	Cloruro de sodio	NaCl	39
	Salitre de Chile	NaNO ₃	26
	Salitre potásico	NaNO ₃ •KNO ₃	18
Ni	Sulfato de níquel	NiSO ₄ •7H ₂ O	20
Se	Seleniato de sodio	Na ₂ SeO ₄	25
Si	Termofosfato de magnesio o magnesiano	-	25 SiO ₂
	Silicato de potasio	K ₂ Si ₂ O ₅ -K ₂ Si ₂ O ₂	11.65
	Silicato de sodio	Na ₂ SiO ₃	16.4-17.8(6% Na)

Tabla 8. Tenores internacionales de micronutrientes en los fertilizantes, enmiendas y abonos orgánicos (Adriano, 1986; Malavolta, 1994; Orlando Filho et al. en Malavolta, 1994).

Fuente		Co	Ni	Se	Si	Na	
		mg kg ⁻¹			%		
Fertilizantes y enmiendas	Ácido fosfórico	-	0-18	-	-	-	
	Cal	1-2	10-70	-	-	-	
	Dolomita	5	1-5	-	-	-	
	Cloruro de potasio	8-9	< 1	-	-	-	
	Fosfato diamónico	1.6-11	-	0.1-0.5	-	-	
	Fosfato monoamónico	1.6-3.1	-	0.1-0.6	-	-	
	Fosfoyeso	2	2	-	-	-	
	Nitrato de amonio	9	34	-	-	18	
	Nitrato de calcio	7-10	19-27	-	-	-	
	Nitrato de potasio	-	5	-	-	-	
	Nitrato de sodio	2-7	0.1	-	-	26	
	Nitrocalcio	5	30	-	-	-	
	Roca fosfórica	6-104	1-61	0.2-11.0	-	-	
	Salitre potásico	5	5	-	-	-	
	Silicato de calcio	5	200	-	8.16	-	
	Sulfato de amonio	0-110	6-32	-	-	-	
	Sulfato de potasio	6-8	0-5	-	-	-	
	Superfosfato simple	0-13	0-38	-	-	-	
	Superfosfato triple	1-4	24	0.5-13.8	-	-	
	Urea	0-5	-	-	-	-	
Abonos orgánicos	Cama de Pollo	2.0	-	0.38	-	-	
	Estiércol de ganado	5.9	29	2.4	-	-	
	Estiércol de vicuña*	-	-	-	-	0.27	
	Torta de filtro de caña de azúcar	1.4	-	-	6.66	-	
	Barros cloacales	EE.UU.	9.6	235	311	-	-
		Reino Unido	24	510	-	-	-
		Suecia	15	121	-	-	-
Canadá		19	380	-	-	-	
Nueva Zelanda		21	350	-	-	-	

*Ortega, (inédito).

Bibliografía

- Arnon, D. I., y P. R. Stout. 1939. The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. *Plant Physiol.* 14(2):371–375.
- Brown, P.H., R.M. Welch, y E.E. Cary. 1987. Nickel: A micronutrient essential for higher plants. *Plant Physiol.* 85:801-803.
- Brownell, P.F. 1965. Sodium as an essential micronutrient for a higher plants (*Atriplex vesicaria*). *Plant Physiol.* Lancaster, 40, 460.
- Chapman, H. 1966. Diagnostic criteria for plants and soils. Ed. University of California Division of Agricultural Sciences. USA. 793 p.
- Delwiche C.C., C.M. Johnson, y H.M. Peisenauer. 1961. Influence of cobalt on nitrogen fixation by *Medicago*. *Plant Physiol.* 36(1):73.
- Epstein, E. 1999. Silicon. *Annu. Rev. Plant Physiol Plant Mol. Biol.* 50:641-664.
- Eskew, D.L., R.M. Welch, y E.E. Cary. 1983 Nickel: an essential micronutrient for legumes and possibly for all higher plants. *Science.* 222:621-623.
- Eskew D.L., R.M. Welch, y E.E. Cary. 1984. Nickel in higher plants: Further evidence for an essential role. *Plant Physiology.* 76:691-693.
- FAO. 2005. Plant Nutrition. Consulta Feb 2006 en: <http://www.fao.org/ag/agp/agpc/doc/publicat/faobul4/faobul4/b402.htm>.
- Ferreira, M.E., M.C. Pessôa da Cruz, B. Van Raij, C.A. de Abreu. 2001. Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura. Ed. CNPq, FAPESP, POTAFOS. Jaboticabal (SP), Brasil. 600 p.
- Francelli, A. 2005. Micronutrientes na fisiología de plantas e sua importância na redução de enfermidades. *Actas de la Primera Jornada Nacional de Micronutrientes: Diagnóstico y tecnología de fertilización.* La Plata, Argentina
- Hernández Gil, R. 2002. Nutrición Mineral de las Plantas. *LibroBotanicaOn Line.* Ed. Fisiología Vegetal, Departamento de Botánica, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de Los Andes - Mérida – Venezuela consultado en Marzo 2002 en <http://www.forest.ula.ve/~rubenhg/nutricionmineral/>
- Kabata-Pendías, A., y H. Pendías. 1985. Trace elements in soils and plants. CRC Press, Inc. Boca Ratón. 315 p.
- Malavolta, E., y M.F. Moraes. 2005. Orelha de rato. Informe Laboratorio de Nutrição Mineral de Plantas, CENA –USP. Piracicaba, Brasil. 2 p.
- Malavolta, E., G.C. Vitti, y S.A. de Oliveira. 1997. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Ed. POTAFOS, 2^{da} ed., rev. e actual. Piracicaba, Brasil. 319 p.
- Malavolta, E. 1994. Fertilizantes e seu impacto ambiental: Micronutrientes e metais pesados, mitos, mistificação e fatos. Ed. ProduQuímica. São Paulo, Brasil. 153 p.
- Marschner, H. 1986. Mineral Nutrition of Higher Plants. Ed. Academic Press. Cambridge. 674 p.
- Marschner, H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. Ed. Academic Press, 2^{da}. Ed. Cambridge. 889 p.
- Mengel, K., y E. Kirkby. 2000. Principios de nutrición vegetal. Ed. Instituto Internacional del Potasio. 4^{ta}. Ed y 1^{era} en español. Suiza. 607 p.
- Ortega, A. 2002. Interacción entre nutrimentos en suelo y planta en DE SIMONE, M & V FAILDE DE CALVO (eds). 2002. El cultivo del poroto en la República Argentina. INTA. Salta. Argentina. 308 p.
- Ratto, S. 2005. Los microelementos en el sistema productivo. *Actas de la Primera Jornada Nacional de Micronutrientes: Diagnóstico y tecnología de fertilización.* La Plata, Argentina
- Sarasola, A., y M.A.R. de Sarasola. 1975. Fitopatología Curso Moderno. Tomo IV. Fisiogénicas y Prácticas en Fitopatología. Ed. Hemisferio Sur. Buenos Aires. 285 p.
- UC SAREP. 2003. Sustainable Agriculture Research and Education Program, University of California, USDA National Organic Program. National Organic Standards Board Technical Advisory Panel (NOSB TAP) Review. Potassium Silicate for use in crop production. Consulta Marzo 2006 en: <http://www.ams.usda.gov/nop/NationalList/PotassiumSilicateTAP1.pdf>
- USDA. 2001. Agricultural Resources and Environmental Indicators, chapter 4.4, 49 p. Consulta Febrero 2006 en: http://www.ers.usda.gov/publications/arei/ah722/arei4_4/AREI4_4nutrientmgmt.pdf
- Valdiviezo Freire, E., M. Sandoval Villa, R. Carrillo González, G. Alcántar González, y J. A. Santizo Rincón. 2005. Absorción y transporte de cadmio y níquel en tomate. VIII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo.
- Vázquez, Mabel (ed.). 2006. Micronutrientes en la agricultura: Diagnóstico y fertilización en Argentina, la experiencia brasilera. Ed. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Buenos Aires. 207 p.
- Wen, T.N., C. Li, y C.S. Chen. 1988. Ubiquity of selenium containing RNA in plants. *Plant Science.* 57:185-193.
- Wood, B.W., C.C. Reilly, y A.P. Nyezeper. 2004a. Mouse-ear of pecan: A nickel deficiency. *Hort. Science,* 39(6):1238-1242.
- Wood, B.W., C.C. Reilly, y A.P. Nyezeper. 2004b. Mouse-ear of pecan: I. Symptomatology and occurrence. *Hort. Science,* 39(1):87-94.
- Wood, B.W., C.C. Reilly, y A.P. Nyezeper. 2004c. Mouse-ear of pecan: II. Influence of nutrient applications. *Hort. Science,* 39(1):95-100.
- Wood, B.W., R. Chaney, y M. Crawford. 2006. Correcting micronutrient deficiency using metal hyperaccumulators: *Allyssum* biomass as a product for nickel deficiency correction. *Hort. Science,* 41(5):1231-1234. ❁