

# ELEMENTOS ESENCIALES Y BENEFICIOSOS<sup>©</sup>

Mariela Rodríguez S.

Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

[mrodriguezs@unal.edu.co](mailto:mrodriguezs@unal.edu.co)

Víctor J. Flórez R.

Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

[vjflorezr@unal.edu.co](mailto:vjflorezr@unal.edu.co)

## 1 Introducción

Los elementos esenciales para las plantas son 17 incluyendo O, H y C provenientes de H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> y aire, los demás corresponden a los nutrientes minerales, los cuales, según la cantidad absorbida por la planta, se clasifican en macronutrientes y micronutrientes. Los macronutrientes son nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre, los cuales se encuentran en el tejido de las plantas en concentraciones superiores a 0,1%, con base en la masa seca. Los micronutrientes son requeridos en los tejidos de las plantas en concentraciones menores a 100 µg/g de masa seca. Con estos elementos y la luz del sol, las plantas son capaces de sintetizar todos los compuestos que necesitan. Sin embargo, otros elementos minerales, son considerados beneficiosos porque son esenciales para algunas especies de plantas bajo ciertas condiciones (31).

Existen tres criterios por los cuales un elemento es considerado esencial para las plantas, estos son (28, 23):

- ✓ Un elemento es esencial si una planta no puede completar su ciclo de vida en ausencia de tal elemento.
- ✓ Un elemento es esencial si la función de este elemento no puede ser reemplazado por otro elemento mineral.
- ✓ Un elemento es esencial si forma parte de cualquier molécula o constituyente de la planta, que es en sí mismo esencial para ésta, como por ejemplo el nitrógeno en las proteínas o el magnesio en la clorofila.

## 2 Macroelementos primarios

### 2.1 Nitrógeno

El nitrógeno es absorbido por las raíces de las plantas, preferentemente, en forma de nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) o de amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) (32, 23). Los factores que influyen en la absorción de este elemento por parte de la planta son: la especie y el tipo de planta (23), la intensidad lumínica, la presencia de nitrógeno

en el medio y la cantidad de nitrógeno almacenado en las vacuolas (20). En plantas de rosa se ha encontrado que a mayor intensidad lumínica hay mayor absorción de nitrógeno (7), esto mismo sucede en hortalizas (27).

En fertirriego, el nitrógeno se suministra en mayor proporción en forma  $\text{NO}_3^-$  y en menor proporción en forma  $\text{NH}_4^+$ , ya que permite mantener el pH estable en el sistema. En términos generales, se recomienda mantener una proporción de nitrógeno amoniacal entre 15 y 20 % del nitrógeno total (30). En rosa (*Rosa* sp.) se considera que el nitrógeno en forma  $\text{NH}_4^+$  puede ser de hasta un 20% del nitrógeno total (24) y se ha reportado que un aumento en la forma  $\text{NH}_4^+$  limita la absorción del calcio (15).

Una de las funciones más importantes del nitrógeno es la de tener una acción directa sobre el incremento de la masa seca (22) porque favorece el desarrollo del tallo, el crecimiento del follaje y contribuye en la formación de frutos y granos (14). Sin embargo, un exceso de este elemento provoca un crecimiento excesivo del follaje, un escaso desarrollo en el sistema radical y un retardo en la formación de flores y frutos (14).

La deficiencia de este elemento provoca una clorosis en las hojas inferiores y en caso de deficiencias agudas, éstas caen prematuramente y la clorosis se generaliza en toda la planta. En hortalizas como la lechuga, el tomate y el apio la deficiencia de nitrógeno se manifiesta en hojas pequeñas y de color verde amarillento (6). En rosa, la deficiencia de nitrógeno, ocasiona cambio de color en las hojas pasando de verde a verde amarillento, el área foliar y la longitud de los entrenudos se reduce. En cuanto a las flores, estas presentan manchas de color más encendido que lo normal (32). En el cultivo del pompón (*Dendranthema grandiflora* Tzevelev), la deficiencia de nitrógeno presenta tallos con flores de diámetro pequeño, follaje clorótico y hojas de menor tamaño (2). En *Gypsophila paniculata* cv Perfecta, en condiciones de invernadero, se encontró que en la etapa de propagación, el nitrógeno contenido en el tallo y en las hojas se redujo, debido a que se transloca para la formación de raíz. Después del trasplante, se observó que la acumulación de nitrógeno es función de la acumulación de masa seca y, posteriormente, en la fase de floración, el nitrógeno disminuyó en las hojas y aumento en las flores (25).

El exceso de nitrógeno ocasiona maduración dispereja en los tomates, los cuales presentan tintes amarillos y verdes alrededor del cáliz; en pepino (*Cucumis sativus*) ocasiona quemazón de los bordes de las hojas (6).

## 2.2 Fósforo

El fósforo es absorbido predominantemente como anión monovalente fosfato ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) y en menor cantidad como anión divalente ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ) (28). La presencia de una u otra forma iónica depende del pH. El  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  se encuentra en un pH entre 4,5 y 7 y el  $\text{HPO}_4^{2-}$  se encuentra a pH básico. En un pH alcalino la disponibilidad del fósforo está limitada por la formación de fosfatos de calcio, no aprovechables por las plantas. Igualmente, en condiciones de pH bajo, la alta solubilidad del aluminio y del hierro precipitan el fósforo, limitando la disponibilidad de este elemento para las plantas (18).

El fósforo juega un papel importante en el metabolismo energético de la planta, porque hace parte de las moléculas AMP, ADP y ATP (28, 5, 23). Forma parte de los ácidos nucleicos ADN y ARN y, además, participa en la fotosíntesis, la respiración y la síntesis de almidón. El fósforo también forma parte de otros compuestos como el ácido fítico, importante en la germinación de semillas y en el desarrollo de la raíz (32, 28, 5, 23).

La deficiencia de fósforo afecta el desarrollo debido a que la producción de proteínas es muy baja y la síntesis de almidón, celulosa y sacarosa se reducen. Un efecto notorio de la deficiencia de fósforo

es la reducción en la expansión celular (23), razón por la cual, las plantas pueden presentar enanismo (28).

El fósforo se encuentra en mayor proporción en las hojas jóvenes, flores y semillas en desarrollo (28). La deficiencia de éste elemento en plantas de girasol (*Helianthus annuus*) provoca un desarrollo insuficiente de las flores. En la coliflor (*Brassica oleracea*) se manifiesta en hoja erguidas y rígidas. En pepino se presenta rigidez en la planta (6). En rosa los brotes se desarrollan lentamente y las hojas más viejas se enrollan hacia abajo. En pompón se presentan flores más pequeñas y hojas de menor tamaño (2).

En *Gypsophila* cv Perfecta, durante los estadios tempranos de desarrollo, se incrementó la demanda de fósforo. Posteriormente, en el análisis de las flores, éstas presentaron una mayor concentración de este nutriente en relación con los demás órganos de la planta (25).

### 2.3 Potasio

El potasio es un catión univalente ( $K^+$ ) y junto con el nitrógeno son absorbidos en grandes cantidades por las plantas (14). La mayor parte del potasio absorbido depende de la difusión del elemento y de otros factores, como contenidos muy altos de calcio y magnesio, los cuales disminuyen la absorción del potasio (17). Este nutriente mineral es el más abundante en el citoplasma, y su importancia fisiológica radica en el papel que juega en el metabolismo de los carbohidratos y las proteínas. Por otra parte, contribuye a la economía del agua porque regula la apertura estomatal, importante para la absorción de  $CO_2$  y el control de la transpiración (29, 4). Así mismo, aumenta la velocidad de reacción en más de 50 enzimas y, en algunos casos, aumenta la afinidad por el sustrato (23). Entre las enzimas sobre las cuales actúa el potasio, se encuentra la piruvato quinasa, enzima esencial en la respiración y en el metabolismo de los carbohidratos.

En plantas deficientes de potasio hay disminución en los niveles de almidón y aumento de compuestos nitrogenados solubles. La deficiencia de este nutriente produce un estancamiento en el desarrollo de la planta: los entrenudos de los tallos son cortos y los tallos resultan débiles, así mismo, la producción de granos y frutos se ve afectada. En el fruto, la presencia de potasio asegura un buen contenido de azúcares, ácidos y aroma. En forma general, la deficiencia de potasio en frutos disminuye la acidez, aumenta la respiración y, por lo tanto, induce el deterioro. En rosa la deficiencia de potasio produce flores pequeñas, el área foliar disminuye y presenta quemazón marginal en las hojas más viejas (32). En colirrábano (*Brassica oleracea* var *Gangylodes*) y en tomate la deficiencia de potasio ocasiona necrosis marginal de las hojas. En frutos de tomate, la deficiencia de potasio da frutos con síntomas de “dorso verde” (6), frutos pequeños, insípidos y blandos. En el tallo, la médula se desintegra. En pompón, la deficiencia de potasio reduce el tamaño de la flor y la longitud de los tallos, así como el tamaño de la hoja (2). En plantas de *Gypsophila*, se observó una fuerte ganancia de potasio en el tallo después del trasplante (25). En plantas de clavel, con alta incidencia de rajados de tallo, se encontró una alta concentración de potasio y una deficiencia de calcio, este desbalance está asociado a un exceso de absorción de nitratos (9). Con esta información se realza la importancia de mantener un suministro balanceado tanto de potasio como de calcio. A este respecto, algunos autores recomiendan cantidades equilibradas de potasio y calcio en clavel, para mantener los niveles óptimos de estos elementos en los tejidos (16).

## 3 Macroelementos secundarios

### 3.1 Azufre

Las raíces de las plantas absorben el azufre en forma de aniones de sulfato ( $SO_4^{=}$ ) y su contenido en los tejidos vegetales es variable, siendo las Crucíferas las que tienen un contenido mayor. El azufre

forma parte de proteínas y vitaminas como la tiamina y la biotina, y es componente de numerosas enzimas. Es constituyente de compuestos volátiles (isotiocianatos y sulfóxidos) responsables por el olor característico de algunas especies como la cebolla y el ajo. Además, es componente de los sulfolípidos, los cuales son constituyentes de la membrana y ayudan a regular el transporte de iones (10, 23).

Debido a que los compuestos fertilizantes forman iones en el agua, se recomienda no mezclar sales que aporten calcio con aquellas que aporten sulfatos o fosfatos, como es el caso del sulfato de amonio ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) con el nitrato de calcio (Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>). La reacción de estos dos fertilizantes da como resultado sulfato de calcio (CaSO<sub>4</sub>), el cual se precipita, limitando la disponibilidad tanto del calcio como del azufre. En la Tabla 1 se presentan las fuentes fertilizantes que contienen sulfatos y su incompatibilidad con otras fuentes fertilizantes (12).

Tabla 1. Fuentes de fertilizantes con sulfato y su incompatibilidad con otros fertilizantes.

<b>Fuente fertilizantes con sulfato</b>	<b>Incompatible con:</b>
Sulfato de amonio	Nitrato de calcio
Sulfato de potasio	Nitrato de calcio
Sulfato de Fe, Zn, Cu, Mn	Nitrato de potasio, fosfato de amonio, ácido fosfórico y ácido nítrico
Sulfato de magnesio	Nitrato de calcio y fosfato de amonio

La deficiencia de azufre en plantas de tomate reduce la masa seca de la raíz, igualmente, inhibe la síntesis de proteínas. En plantas de *Gypsophila* el azufre es importante en la fase de enraizamiento para la formación de raíz, posteriormente, en la fase vegetativa hay una alta concentración de este elemento en el tallo (25). En el cultivo de pompón, las plantas con deficiencia inducida de azufre presentaron disminución en la altura y flores de mala calidad, con pétalos tubulares y marchitez rápida (2).

### 3.2 Calcio

El calcio (Ca<sup>2+</sup>) es un elemento esencial porque interviene en la estabilidad de la membrana plasmática y en la integridad de la célula, ya que es componente básico de la lámina media de la pared celular, en forma de pectatos de calcio. Estos pectatos le confieren consistencia y cierto grado de rigidez a la pared celular. Igualmente, preserva la estructura de las membranas celulares al regular su permeabilidad. La presencia de pectatos de calcio en las paredes celulares protege los tejidos contra el ataque de hongos. Por otra parte, es un elemento importante en el crecimiento del tubo polínico (23). La deficiencia de este elemento impide el desarrollo de la planta, ya que los tejidos meristemáticos de la parte aérea y de la raíz se afectan por división celular incompleta. Como consecuencia, las hojas y las raíces nuevas se desarrollan con deformaciones. La deficiencia de calcio en plantas de girasol ocasiona el tallo curvado hacia abajo antes de la aparición de la flor. En coliflor, la deficiencia se observa en las hojas más jóvenes, presentándose una deformación en forma de garra. En el follaje de tomate causa clorosis y necrosis marginal y hojas de bordes rizados hacia delante, en frutos ocasiona la pudrición apical. Esta misma sintomatología se presenta en frutos de pimentón (6). En rosa las raíces se tornan quebradizas, las hojas y los pétalos de las flores presentan deformaciones. Es importante destacar que el calcio en la planta se moviliza por el xilema, por lo tanto, su deficiencia puede ser inducida por condiciones climáticas que no favorecen la corriente transpiratoria en la planta, lo cual está relacionado con los mecanismos de absorción de éste nutriente, que se realiza por intercepción radical y flujo de masas (17). En frutos de tomate, el período crítico para la absorción del calcio, es cerca de dos semanas después de la antesis, cuando la tasa de crecimiento del fruto es alta. Por lo tanto, días nublados en esta etapa, conllevan a la pudrición apical del mismo (11). Otro factor a considerar, es el antagonismo entre el calcio y el

magnesio. Una deficiencia de calcio puede provocar mayor absorción del magnesio, provocando síntomas de fitotoxicidad. En el caso contrario, altos contenidos de calcio regulan la absorción del potasio, evitando el consumo de lujo de éste elemento (17).

### 3.3 Magnesio

El magnesio es absorbido por las plantas como un catión divalente ( $Mg^{2+}$ ), su absorción puede ser afectada por relaciones altas de Ca/Mg, en cuyo caso las plantas absorben menos magnesio. La deficiencia de magnesio puede acentuarse con dosis altas de potasio (18). El magnesio tiene funciones importantes dentro de la planta: es el átomo central de la molécula de la clorofila, interviene en la síntesis de proteínas, en el metabolismo del fósforo, en la respiración y en la activación de varios sistemas enzimáticos en las plantas. Entre estos sistemas se tiene la fructosa 1,6 difosfatasa, la cual regula la síntesis de almidón (23).

La deficiencia de magnesio se caracteriza por una clorosis de las hojas bajas. Si la deficiencia continua, la clorosis se generaliza en toda la planta. En rosa hay reducción del crecimiento de los brotes y del tamaño de la hoja. También se pueden presentar pigmentos antocianínicos, con coloraciones púrpura y posteriormente necrosis (32). En plantas de *Gypsophila* el magnesio se encontró en mayor proporción en las hojas. En clavel (*Dianthus caryophyllus* L.) se requieren altos niveles de magnesio para un crecimiento óptimo, aunque este valor es menor que los de potasio y calcio (16).

## 4 Microelementos

Ocho de los 17 nutrientes esenciales para las plantas se denominan microelementos y, en general, son los elementos por excelencia catalíticos, ya que son esenciales en las reacciones redox a nivel biológico. Los microelementos aceptados como esenciales son: B, Cl, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni y Zn. Estos elementos son tan importantes para la planta como los nutrientes primarios y secundarios, a pesar que son requeridos en concentraciones menores a 100  $\mu\text{g/g}$  de masa seca (31).

Los elementos menores como el cobre, el zinc, el hierro y el manganeso se aplican en forma de quelatos, mientras que el boro y el molibdeno se aportan en forma de sales.

### 4.1 Boro

El boro es absorbido por la planta en forma de anión  $H_2BO_3^-$ , posiblemente por un proceso de difusión pasiva a través de la membrana plasmática con la formación de enlaces  $\beta$ -cis-diol con azúcares u otros componentes polihidroxílicos (31). Este elemento es básicamente transportado por el xilema, lo que implica que su distribución en las plantas está determinada principalmente por la transpiración ya que es un elemento poco móvil. El papel de boro en la nutrición de las plantas es de los menos comprendidos. Sin embargo, es conocido que la deficiencia de boro inhibe la elongación de la raíz y la síntesis de ADN. Igualmente, la deficiencia de boro induce la acumulación de fenoles que al ser activados por la luz producen radicales superóxidos que pueden dañar las membranas. Es esencial para la germinación de los granos de polen y el crecimiento del tubo polínico (23).

Por otra parte, su deficiencia se observa en las yemas más jóvenes, las cuales se decoloran y pueden morir. Esto promueve la proliferación de brotes con entrenudos cortos, dando la apariencia de una roseta. También, puede ocurrir clorosis intervenal en las hojas maduras. Así mismo, se puede registrar un incremento en el diámetro de los pecíolos y tallos de las hortalizas, y caída de yemas, flores y frutos en desarrollo. En estructuras de almacenamiento como son las raíces de la zanahoria y la remolacha, ocurre necrosis de las áreas de crecimiento, lo que puede producir la sintomatología conocida como corazón negro. Además, pese a que el número total de semillas no es afectado, si se reduce la viabilidad de las mismas (23). En girasol se observan deformaciones en la inflorescencia y

puede ocasionar muerte del meristemo apical. En coliflor, la deficiencia de boro reduce el tamaño de la cabeza y la corona se puede tornar blanda y parda. En rosa, la deficiencia de boro produce flores deformes y descoloridas, también se observa clorosis foliar y los brotes son reducidos o senescentes. En crisantemo las flores son deformes y descoloridas, en plantas con deficiencias severas los meristemos apicales mueren y las hojas se deforman (6). En *Gerbera* sp. la deficiencia tardía de boro, produce flores deformes en forma de cuchara y ocasiona la muerte de los meristemos apicales (6). En poinsetia, la deficiencia del elemento se manifiesta en hojas cloróticas y meristemos apicales muertos (6). En plantas de *Gypsophila* se encontró que a pesar de la baja movilidad del elemento, éste se removilizó desde las hojas hacia las flores en formación (25).

La fitotoxicidad por boro se manifiesta en girasol con clorosis y necrosis marginal de las hojas. En tomate el exceso de boro se observa en las hojuelas del cáliz, las cuales se tornan rizadas con puntas necróticas. En lechuga, el exceso de boro produce necrosis marginal en las hojas más viejas (6).

## 4.2 Cloro

El cloro es fácilmente tomado por las plantas en su forma de ión inorgánico (Cl<sup>-</sup>) y es altamente móvil dentro de la misma. Este elemento está involucrado en la fotosíntesis, ya que es requerido para la fotólisis del agua en el sitio de oxidación del fotosistema II, además, juega un papel importante en la regulación estomática, sirviendo de anión acompañante al potasio en su entrada y salida de las células guardas. También, está implicado en el balance de las cargas y en el ajuste osmótico dentro de las células (31). Otra función menos conocida tiene que ver con la división celular. En muchas plantas, la ausencia de cloro se manifiesta en una reducción del área foliar y, por tanto, en la masa seca de la planta, resultado de la disminución en las tasas de división y de extensión celular (23). Sin embargo, es difícil que se presente la deficiencia de este elemento en las plantas cultivadas, porque, generalmente, el agua de riego tiene suficiente cantidad de cloro para suplir las necesidades del cultivo (19). Entretanto, los excesos de cloruros si causan problemas. En plantas de rosa los excesos de cloruros y sodio causan necrosis y defoliaciones fuertes en las hojas viejas. Estos excesos pueden causar el agrietamiento del tallo causando alta incidencia de enfermedades (24).

## 4.3 Cobre

El cobre es un catión divalente (Cu<sup>2+</sup>) que junto con el hierro y el manganeso interviene en la síntesis de la clorofila. Se suministra en forma de quelatos en la solución fertilizante. Hace parte de numerosas enzimas, entre las cuales se destacan las siguientes (23): 1) plastocianina, la cual tiene por función la transferencia de electrones en el fotosistema I. En general, más del 50% del cobre localizado en los cloroplastos está ligado a la plastocianina; 2) citocromo oxidasa, actúa en el transporte de electrones en las mitocondrias y, por tanto, en los ciclos respiratorios; y 3) polifenol oxidasas, involucradas en la biosíntesis de lignina y alcaloides y en la formación de sustancias melanóticas, que actúan como fitoalexinas inhibiendo la germinación de esporas y el crecimiento de hongos. En condiciones de deficiencia, la disminución en la actividad de las enzimas es drástica y está correlacionada con la acumulación de fenoles y el decrecimiento de formación de sustancias melanóticas.

En las plantas deficientes de cobre se presenta marchitamiento en las hojas jóvenes, lo cual resulta de dificultades en el transporte del agua, debido a una insuficiente lignificación en las células del xilema. Es importante en la fotosíntesis, por lo que su deficiencia repercute en bajas tasas fotosintéticas y, por lo tanto, bajos niveles de carbohidratos (23). La deficiencia de cobre ocasiona hojas deformes en girasol. En rosa, hojas cloróticas y botones marchitos. En crisantemo, necrosis

marginal de las hojas, éstas se deforman y las láminas foliares y los pecíolos se observan curvados (6). En tomate, los frutos se agrietan antes de madurar (3).

Un gran número de especies tiene un desarrollo óptimo en un medio con pH entre 5 y 7, por lo que, es necesario considerar que el cobre a pH básico se precipita formando hidróxidos insolubles que no son disponibles para la planta (19).

#### 4.4 Hierro

Las formas de hierro más comunes en el suelo y en las soluciones nutritivas son los quelatos de  $\text{Fe}^{3+}$  y de  $\text{Fe}^{2+}$ . Sin embargo, la forma catiónica que es absorbida significativamente por las raíces es  $\text{Fe}^{2+}$ , mientras que, el hierro en forma  $\text{Fe}^{3+}$  necesita ser reducido en la superficie de las raíces antes de ser transportado al citoplasma (31). Es un elemento asociado con el desarrollo de los cloroplastos, la síntesis de ferredoxina y la de clorofila. La ferredoxina actúa en varios procesos metabólicos como la fotosíntesis y la reducción del nitrógeno. En condiciones de crecimiento controladas, aproximadamente el 80% del hierro está localizado en los cloroplastos de hojas de rápido desarrollo, lo cual evidencia la importancia del hierro en la fotosíntesis. La deficiencia de hierro puede tener varias causas: 1) Por un desbalance con otros elementos, como el exceso de fósforo y los altos niveles de bicarbonato; 2) En pH básico, porque el hierro forma compuestos insolubles no disponibles para las plantas (12); y 3) En suelos ácidos, el aluminio soluble es más abundante y restringe la absorción del hierro (28).

La deficiencia de hierro se caracteriza porque las plantas desarrollan una clorosis intervenal pronunciada. Debido a que este elemento es poco móvil dentro de la planta, los síntomas de deficiencia aparecen en las hojas jóvenes de la parte superior de la misma. Las plantas de rosa son sensibles a la deficiencia de hierro, que puede ser inducida por el exceso de nitratos en la rizosfera, lo que puede originar clorosis en las hojas, que pueden llegar a ser severas (24).

En el sistema de riego, el hierro puede ocasionar taponamiento de los sistemas por goteo. En los casos en que el agua proviene de pozos profundos ricos en este mineral, al llegar a la superficie forma  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , el cual se precipita y es insoluble. Estos precipitados se forman lentamente, por lo que es conveniente tomar medidas correctivas, con el fin de evitar daños al sistema (8).

#### 4.5 Manganeso

El manganeso se absorbe sobre todo como catión manganeso ( $\text{Mn}^{2+}$ ), aunque en el suelo también puede existir como  $\text{Mn}^{3+}$  o  $\text{Mn}^{4+}$ , óxidos insolubles y quelatos. El manganeso es soluble a pHs ácidos y en suelos encharcados. Su solubilidad se reduce en suelos alcalinos o ácidos con alto contenido de materia orgánica (14, 21). El manganeso es importante en el proceso fotosintético, ya que junto con el cloro, participa en la fotólisis del agua. Por otra parte, la presencia de este elemento en el fotosistema II favorece la fotofosforilación, la reducción del  $\text{CO}_2$ , y la reducción del nitrito y del sulfato. Además, parece ser constituyente estructural de los ribosomas. Por tal razón, su deficiencia podría ocasionar una fuerte reducción de la tasa fotosintética.

Aunque la deficiencia de este elemento no es común, es importante tener en cuenta que este es un elemento poco móvil en la planta y su deficiencia se manifiesta primero en las hojas jóvenes. Al respecto, se ha identificado una sintomatología foliar para monocotiledóneas y dicotiledóneas. En monocotiledóneas, las deficiencias aparecen en forma de puntos de color gris verdoso. Mientras que en dicotiledóneas, se manifiesta por la presencia de puntos amarillos en las hojas jóvenes. En fases avanzadas únicamente las nervaduras y las zonas adyacentes se mantienen verdes (23). La presencia de carbonatos y altos contenidos de fósforo disminuyen la disponibilidad de este micronutriente. Así mismo, un desbalance a favor del Fe, Cu y Zn disminuyen la toma de este elemento por parte de la planta (18).

## 4.6 Molibdeno

Este micronutriente es absorbido bajo la forma de oxianión molibdato ( $\text{MoO}_4^{2-}$ ). Su absorción por las raíces puede ser afectada por la presencia del ión  $\text{SO}_4^{2-}$ , porque los mecanismos que controlan la absorción de  $\text{SO}_4^{2-}$  también pueden afectar la remoción de  $\text{MoO}_4^{2-}$  (31). La importancia del molibdeno radica en que es un constituyente esencial de las enzimas que tienen que ver con la fijación biológica de nitrógeno y con la reducción de nitrato a amonio; estas enzimas son la nitrogenasa y la nitrato reductasa respectivamente (23). Por estas razones, las deficiencias de molibdeno están correlacionadas con el metabolismo del nitrógeno. La coliflor y el repollo son sensibles a la deficiencia de este elemento, presentando como sintomatología característica “la cola de látigo”, que se caracteriza por desarrollar la nervadura central con una área foliar mínima.

La deficiencia de este elemento puede presentarse en suelos ácidos, con presencia de óxidos de hierro y aluminio, los cuales adsorben el molibdeno. Su disponibilidad aumenta por factores tales como el incremento del pH y la presencia de fósforo. Por otra parte, el magnesio aumenta la toma de molibdeno por parte de la planta (18).

## 4.7 Zinc

El zinc es absorbido por la planta como catión divalente ( $\text{Zn}^{2+}$ ) o quelato vía radical o foliar. Este es un elemento transportado vía xilema y relativamente poco móvil en el interior de la planta. El zinc es importante, porque es constituyente de la enzima anhidrasa carbónica, que cataliza la formación de ácido carbónico a partir de  $\text{CO}_2$  y agua. Esta enzima está localizada tanto en los cloroplastos como en el citoplasma. Por otra parte, este micronutriente se requiere para el mantenimiento de las biomembranas, donde forma complejos con grupos fosfolípidos y sulfidrilos, protegiendo los lípidos de membrana y proteínas frente a daños oxidativos, por lo tanto, su deficiencia ocasiona un aumento en la permeabilidad de las membranas. Otra función importante, es que hace parte del aminoácido aromático triptófano, precursor de las auxinas. En plantas de tomate con deficiencia de zinc, hay retardo en la elongación del tallo, lo que está correlacionado con una disminución de la síntesis de ácido indol-3-acético (AIA) (23).

La deficiencia de zinc comienza en las hojas jóvenes, las cuales presentan un amarillamiento progresivo y disminución del tamaño de la hoja (1). En rosa, la deficiencia de este nutriente se manifiesta por la muerte de los puntos de crecimiento, que con el consecuente desarrollo de brotes laterales, se presentan desarrollos vegetativos en forma de roseta (32).

La disponibilidad de este nutriente aumenta con la disminución del pH y la presencia de sulfato. Mientras que su disponibilidad disminuye a pH básico. Otros factores como la interacción con cobre, hierro, manganeso y suelos con alta disponibilidad de fósforo reducen la toma de zinc (18).

## 4.8 Níquel

Este es el último elemento adicionado a la lista de elementos esenciales para las plantas. Su importancia radica en que hace parte de la enzima ureasa que disocia la urea en  $\text{CO}_2$  y  $\text{NH}_4^+$ . En plantas con deficiencia de níquel, la concentración de urea aumenta en las hojas hasta niveles tóxicos. La esencialidad de este elemento fue demostrada en cebada, donde se encontró que después de tres generaciones sin níquel, las semillas eran incapaces de germinar y presentaban deformaciones anatómicas (28). En general, el níquel juega un papel importante en el metabolismo de la urea y de los ureidos, en la absorción del hierro, en la viabilidad de las semillas, en la fijación del nitrógeno y en el desarrollo reproductivo (23).



## 5 Elementos esenciales beneficiosos

Estos elementos estimulan el crecimiento y el desarrollo en las plantas pero no se consideran esenciales porque no cumplen con los criterios de esencialidad. Sin embargo, se ha encontrado que algunos de estos minerales son esenciales para ciertas especies de plantas, bajo condiciones específicas. Este criterio se aplica especialmente al sodio, al silicio y al cobalto, aunque el selenio y el aluminio podrían ser beneficiosos para algunas plantas.

### 5.1 Sodio

El sodio es considerado un elemento beneficioso por tres aspectos: es esencial para ciertas especies, puede reemplazar funciones del potasio en las plantas y tiene un efecto positivo en el desarrollo vegetal. Se cree que algunas plantas necesitan el sodio como micronutriente, como es el caso de las plantas CAM y C<sub>4</sub>. Las plantas C<sub>4</sub> desarrollan síntomas de deficiencia, tales como clorosis y necrosis, sobre todo si crecen en lugares donde las concentraciones de CO<sub>2</sub> son relativamente bajas. Se ha encontrado que las plantas CAM crecen más rápido en la presencia de sodio (23, 28).

En cuanto a las funciones del sodio y el potasio, algunas plantas pueden aumentar su masa seca con sodio aunque existan deficiencias de potasio. Sin embargo, existen plantas que son afectadas negativamente por absorción del sodio (5, 23). En especies de importancia económica como la remolacha azucarera, la fertilización con sodio tiene efecto sobre la expansión celular y el balance hídrico, pues, se han obtenido producciones más altas que en los cultivos fertilizados con potasio. El sodio se usa en tierras de pastura, ya que este mineral incrementa la aceptabilidad del forraje por parte de los animales (23). Pero, la absorción de grandes cantidades de sodio por las raíces puede crear dificultades para la toma de otros elementos como el potasio o el fósforo (5).

### 5.2 Silicio

Se ha demostrado que el silicio es beneficioso para especies de la familia *Cyperaceae* como *Equisetum arvense* y algunas gramíneas como el arroz y la caña de azúcar. En caña de azúcar, el silicio parece estar asociado a la protección contra altas intensidades lumínicas. Esto, en razón a que las plantas de caña de azúcar cultivadas bajo invernadero presentan bajos requerimientos de este mineral, cuando son comparadas con las plantas expuestas al sol. En arroz, la deficiencia de silicio ocasiona un retraso generalizado en el desarrollo, se incrementa la transpiración y las hojas más antiguas mueren. En dicotiledóneas como el pepino, el silicio incrementa la rigidez de las hojas maduras, incrementa el contenido de clorofila y reduce la senescencia. En tomate, la deficiencia de silicio reduce el desarrollo y las hojas nuevas presentan deformaciones y muchas plantas no dan frutos (28).

En cuanto a la interacción con otros nutrientes, el silicio evita la toxicidad que pueda causar el manganeso, redistribuyéndolo en el tejido foliar, evitando la formación de puntos necróticos en las hojas causados por el manganeso. En forma general, el silicio mejora la resistencia contra patógenos y parásitos, y protege contra pérdidas de agua por transpiración cuticular (23).

### 5.3 Cobalto

El cobalto es necesario para la fijación del nitrógeno en las leguminosas y es un mineral esencial para los rumiantes ya que es constituyente de la vitamina B<sub>12</sub>. Se ha demostrado que en ambientes pobres de cobalto la fijación del nitrógeno es escasa. En leguminosas, el cobalto está ligado a la nodulación y consecuente fijación del nitrógeno, por lo tanto, su deficiencia se refleja en la deficiencia de nitrógeno (23, 1). La disponibilidad del cobalto aumenta en medios ácidos y disminuye con la presencia de óxidos cristalinos de manganeso (18).

## 5.4 Selenio

Este elemento es absorbido por las plantas como anión  $\text{SeO}_4^{-2}$  y forma proteínas al igual que el azufre, pero las proteínas que tienen selenio no son funcionales. Existen plantas acumuladoras de selenio en miembros de la familia *Cruciferae*, como el brócoli, pero la mayoría de las plantas cultivadas no acumulan este nutriente. En el género *Astragalus*, que es una planta acumuladora de este mineral, se encontró que el selenio previene la absorción excesiva de fosfatos a niveles tóxicos. Pese a que no se reportan otros beneficios, este es un elemento esencial para animales y humanos (23, 1).

## 5.5 Aluminio

Este mineral podría ser beneficioso en bajas concentraciones para las plantas con alta tolerancia al aluminio (23). Sin embargo, son más conocidos los efectos negativos en condiciones de pH bajo porque precipita el fósforo e inhibe la división celular. Además, disminuye la absorción de fósforo, calcio, magnesio, potasio, hierro y boro (18).

## 6 Bibliografía

1. Alarcón V., A. 2000. Nutrición mineral: elementos esenciales y dinámica en el sistema suelo-planta. En: Tecnología para cultivos de alto rendimiento. p. 109-129.
2. Ángel, M. y R. Campos. 1988. Estudio del efecto de las deficiencias de nutrientes minerales en el cultivo del pompón (*Chrysanthemum morifolium*) en la sabana de Bogotá. En: IX Congreso colombiano de la ciencia del suelo (memorias). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia - Facultad de ciencias Agrarias, Tunja.
3. Aponte L., A., 1999. Bases fundamentales de anatomía y fisiología vegetal. En: Cultivos protegidos con técnica hidropónica y biológica, Bogotá, p. 23-41.
4. Azcón-Bieto, J. y M. Talón. 2001. Fundamentos de fisiología vegetal. McGraw-Hill-Interamericana, Madrid, 522p.
5. Barceló C., J., Nicolás R., G., Sabater G., B. y R. Sánchez T. 1995. Nutrición mineral. En: Fisiología vegetal. 7 ed. Ediciones Pirámide S.A., Madrid, p 151-167.
6. Bergman, W., 1993. Ernährungs-störungen bei kultur-pflanzen. Gustav Fischer Verlag Sena-Stuttgart.
7. Cabrera, R. I., Evans, R.Y. y J. L. Paul. 1995. Cyclic nitrogen uptake by greenhouse roses. *Scientia Horticulturae* 63: 57-66.
8. Calderón, F. 1996. ¿Por qué se tapan los sistemas de riego por goteo? En: Labnews. Serie divulgativa No 5. Dr. Calderón Labs. Bogotá.
9. Calderón, F. 2001. Contribución al conocimiento sobre el rajado del tallo en clavel (*Dianthus caryophyllus* L.). En: <http://www.drcalderonlabs.com>.
10. Clavijo P., J. 1994. Metabolismo de los nutrientes en las plantas. En: Fertilidad de suelos. Silva M., F. (ed.). Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bogotá, p.13-28.
11. Clover, A. 1991. A new theory on calcium transport. *Grower* 7: 3-5.
12. Estrada, G. 1997. Caracterización y preparación de fertilizantes líquidos para fertirrigación. En: Fertirrigación. Silva M., F. (ed.). Sociedad Colombiana de la ciencia del suelo, Bogotá, p. 61-72.
13. García, A. 1997. Manejo de la problemática de la salinidad en cultivos fertirrigados. En: Fertirrigación. Silva M., F. (ed.). Sociedad Colombiana de la ciencia del suelo, Bogotá, p. 91-106.
14. Guerrero, R. 1993. Los nutrientes de las plantas. En: Fertilización de cultivos en clima frío. (vol. 3). Monómeros Colombo Venezolanos S. A. (E.M.A.), Barranquilla, p. 9-13.

15. Handbook for modern greenhouse rose cultivation. 2001. Applied Plant Research, Netherlands, 220p.
16. Holley, W.D. and R. Baker. 1991. Carnation production. Colorado State University. Kendall/Hunt Publishing company. Iowa, p.39-49.
17. León, L. A. 1994. Evaluación de la fertilidad del suelo. En: Fertilidad de suelos. Silva M., F. (ed.). Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bogotá, p. 154-186.
18. Lora S., R. 1994. Factores que afectan la disponibilidad de nutrientes para las plantas. En: Fertilidad de suelos. Silva M., F. (ed.). Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bogotá, p.29-56.
19. López-Gálvez, J. y C. Segovia. 1996. La fertilización. En: Sistemas de producción e incidencia ambiental del cultivo en suelo enarenado y en sustratos. López-Gálvez, J y J. M. Naredo (eds). Fundación Argentaria-Visor Distribuciones, Madrid, p. 95-110.
20. Maldonado, J. M. 1996. Asimilación del nitrógeno y del azufre. En: Fisiología y Bioquímica Vegetal. Azcón-Bieto, J. y M. Talón (eds.). Interamericana-McGraw-Hill, Madrid, p. 215 - 236.
21. McBride, M.B. 1994. Trace and toxic elements in soils. In: Environmental chemistry of soils. Oxford University Press. Oxford, p. 308-341.
22. McDonald, J., T. Ericsson and C.-M. Larsson. 1996. Plant nutrition, dry mater gain and partitioning at the whole-plant level. *Journal of Experimental Botany*. 47:1245-53.
23. Marschner, H. 1998. Mineral Nutrition of higher plants. Academic Press, San Diego, 889 p.
24. Medina, A. 1999. Manejo de la nutrición en el rosal después de la cosecha de San Valentin. En: Mantenimiento de plantas de Rosa, curso de actualización profesional. Lee, R. (ed.). Centro de Investigaciones y asesorías agroindustriales Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Chía, p. 31-48.
25. Medina A., G. A., Bolivar R., J. L. 1993. Análisis de crecimiento y acumulación de nutrientes de *Gypsophila paniculata* L. cv perfecta bajo condiciones de invernadero en la sabana de Bogotá. Tesis de grado. Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 163 p.
26. Ortega R., D. Fertilización en cultivos de flores. En: Fertilización. Silva M., F. (ed.). Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bogotá, p.135-148.
27. Resh, H. 1992. Nutrición de las plantas: En: Cultivos hidropónicos: Nuevas técnicas de producción. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, p. 23-48.
28. Salisbury, F. B. y C. W. Ross. 1992. Plant physiology. (4<sup>th</sup>. ed.), Wadsworth Publishing, Belmont, 662p.
29. Taiz., L. and E. Zeiger. 1998. Plant physiology. (2<sup>th</sup> ed.). Sinauer Associates, Inc., Publishers, Sunderland, 792p.
30. Universidad Nacional Agraria la Molina. 1996. Hidroponía. En: Curso taller internacional. Centro de investigación de hidroponía y nutrición mineral, Lima.
31. Welch, R. M. 1995. Micronutrient nutrition of plants. *Critical Reviews in Plant Science*, 14(1):49-82.
32. White, J. 1987. Fertilization. In: Roses a manual of greenhouse rose production. Langhans, R.W. (ed.). Published by Roses Incorporated, Michigan, p.87-142.

