

NUTRICIÓN MINERAL DE LAS PLANTAS

Con la energía tomada de la luz solar y el agua, como donador primario de electrones en procesos reductores de síntesis, las plantas pueden producir el resto de moléculas necesarias para su existencia a partir de elementos minerales tomados del suelo, normalmente en forma iónica y de la atmósfera (como el C del CO₂). El C normalmente no es un factor limitante, por lo que la nutrición mineral de las plantas se centra fundamentalmente en la toma de elementos del suelo. La falta de disponibilidad o el exceso de alguno de ellos cursan normalmente con graves alteraciones del desarrollo e incluso con la muerte de la planta.

Los elementos minerales: Definición de elemento esencial

Aunque limitada, las plantas tiene capacidad para absorber y acumular elementos no necesarios para su crecimiento, en consecuencia, ni la presencia ni la concentración de un elemento mineral son criterios de esencialidad. En 1939, Arnon y Stout definieron las características para considerar un elemento esencial para una planta:

- su ausencia debe impedir completar el ciclo vital
- debe tener al menos una clara y determinada función fisiológica no realizable por otro elemento
- debe formar parte de una molécula esencial o debe ser requerido para una reacción enzimática

Además de estos, los elementos beneficiosos son aquellos que, no siendo esenciales, favorecen el crecimiento en ciertas condiciones y especies.

Clasificación de los elementos minerales

Los elementos esenciales se pueden clasificar según:

- la concentración en la planta. (Epstein, 1994)
 - Macronutrientes (>0.1%): H-C-O-N-K-Ca-Mg-P-S-Si (sólo en algunas especies)
 - Micronutrientes (<0.1%): Cl-Fe-B-Mn-Zn-Cu-Ni-Mo-Na (sólo en algunas especies)
- la función bioquímica o biológica. (Mengel y Kirby, 1987)
 - Elementos formadores de compuestos orgánicos: N-S
 - Elementos relacionados con la conservación de energía y/o compuestos estructurales: P-B-Si
 - Elementos que permanecen como iones: K-Na-Mg-Ca-Mn-Cl
 - Elementos involucrados en reacciones redox: Fe-Cu-Zn-Mo-Ni
- la movilidad y translocación en la planta:
 - Elementos móviles: N-K-Mg-P-Cl-Na-Zn-Mo
 - Elementos inmóviles: Ca-S-Fe-B-Cu

Relevancia de cada elemento esencial

La división en macro y micronutrientes no tiene implicación fisiológica cualitativa, ya que todos ellos son igualmente esenciales. Las funciones de los macronutrientes están perfectamente definidas, no así la de algunos micronutrientes. Algunas de ellas son:

- **Macronutrientes**
 - Nitrógeno (N). La planta lo puede obtener preferentemente por absorción radicular del nitrato (NO₃⁻) y del amonio (NH₄⁺), aunque algunas plantas pueden establecer simbiosis con bacteria fijadoras de N₂ atmosférico. Más del 50% del N de la planta se halla en proteínas y ácidos

nucleicos, el resto en moléculas solubles orgánicas (aminoácidos, amidas, amins) con distintas funciones (coenzimas, osmolitos, etc.) o inorgánicas (nitrato y amonio). Su deficiencia se manifiesta en clorosis de hojas y necrosis prematura y su exceso en un aumento de follaje y disminución de frutos y del desarrollo de la raíz.

- Fósforo (P). Se toma del suelo como ion fosfato, preferentemente como H_2PO_4^- en suelos ácidos y en su forma divalente $\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$ en suelos básicos. Permanece como fosfato formando ésteres en los ácidos nucleicos o en moléculas estructurales como los fosfolípidos y como nucleótido, ATP, UDP, GTP, siendo clave en todo el metabolismo. La deficiencia provoca enanismo y retraso en la madurez. En exceso provoca un gran desarrollo radicular.
- Potasio (K). Se toma en forma catiónica. Es el catión más abundante de la vacuola y el principal osmolito de la planta. Además es activador de más de 50 sistemas enzimáticos (oxidorreductasas, deshidrogenasas, transferasas, sintetasa, quinasas...) en los que interviene en el cambio conformacional de la apoenzima. Su deficiencia se traduce en debilidad del tallo, mayor sensibilidad al ataque por patógenos y retraso del crecimiento por pérdida de turgencia. Su exceso puede interferir en la absorción y disponibilidad de otros cationes como el Ca^{2+} o el Mg^{2+} .
- Azufre (S). Se absorbe por la raíz en forma de anión sulfato (SO_4^{2-}) aunque los estomas pueden absorber el contaminante dióxido de azufre (SO_2), que reacciona con el agua para formar bisulfito (HSO_3^-) que desplaza al Mg de la clorofila inutilizándola. El S forma parte de aminoácidos como la cisteína y la metionina o se integra en coenzimas como la tiamina, la biotina o el CoA; como sulfato forma parte de heteropolisacáridos y sulfolípidos. El estado oxidado o reducido de los grupos -SH de muchas enzimas determina la actividad de estas. Los aminoácidos azufrados de las fitoquelatinas forman complejos con metales pesados, siendo un mecanismo de defensa contra ellos. Las deficiencias son muy raras, pues normalmente hay sulfato disponible en todos los suelos, y llevan a plantas rígidas y quebradizas.
- Calcio (Ca). Se absorbe como catión Ca^{2+} . Como elemento estructural forma parte de la matriz de la pared celular. Actúa como cofactor de algunas enzimas, como las ATPasas. Además, como segundo mensajero está implicado en la fosforilación de proteínas. Su unión reversible a calmodulina le implica en la señalización celular durante el desarrollo vegetal. Su deficiencia conlleva pobre desarrollo. Es primordial mantener una concentración muy baja (del orden de 1 mM) de Ca^{2+} citosólico, y la planta dispone de numerosos mecanismos de homeostasis para regular esta concentración, que implican a la vacuola, pero también al cloroplasto y al retículo endoplasmático. Pequeños cambios puntuales en el nivel de Ca^{2+} intracelular forman parte de muchas rutas de transducción de señales.
- Magnesio. Se absorbe y permanece como catión Mg^{2+} y no suele ser limitante. En caso contrario, la deficiencia produce clorosis, al no encontrarse en el anillo porfirínico de la clorofila. También se encuentra en forma libre en el espacio intratilacoidal del cloroplasto, donde al iluminarse este, pasa al estroma, pudiendo activar a enzimas tan importantes para la fotoasimilación como la RuBisCo, la fosfoenolpiruvato (PEP) carboxilasa y la glutamato sintasa. Además interviene en el metabolismo energético formando complejos con el ATP.
- Silicio. En algunas plantas como *Equisetum* (donde es el 16% de su peso seco) o gramíneas se deposita en la pared celular dándole a la vez rigidez y elasticidad, además de aumentar su impermeabilidad y ser barrera física contra patógenos. En diatomeas es el constituyente fundamental de su cubierta.

• Micronutrientes

- Hierro (Fe). Se requiere en cantidad prácticamente de macronutriente. aunque se puede absorber como ion férrico Fe^{3+} (Fe III) es mucho más soluble como ion ferroso Fe^{2+} (Fe II). Como Fe-porfirina forma parte de hemoproteínas como citocromos mitocondriales y cloroplásticos, catalasas o peroxidasas y, como complejo Fe-S de sulfoproteínas como la ferredoxina, clave en la fotosíntesis, enzimas de la cadena electrónica mitocondrial, la nitrito reductasa, la sulfito reductasa o la nitrogenasa (importante en plantas que establecen simbiosis fijadoras de N_2 atmosférico). Su deficiencia modifica la estructura del cloroplasto y provoca la llamada clorosis férrica. En suelos básicos la disponibilidad es muy reducida por lo que en prácticas agrícolas se aplica en forma de complejos orgánicos (quelatos) asimilables por las plantas.

- Manganeseo (Mn). Existe en distintos estados de oxidación. Activa numerosas enzimas (descarboxilasas, deshidrogenasas, quinasas, oxidasas...) pero su presencia sólo se ha demostrado en la Mn-proteína que transporta los electrones desde el agua al fotosistema II y en la Mn-superóxido dismutasa (SOD) presente en las mitocondrias, peroxisomas y, en menor medida, en cloroplastos. Su deficiencia es rara, pues lo puede suplir el Mg, y su toxicidad radica en la competencia por los sitios de unión del Fe.
- Cobre (Cu). Su deficiencia es rarísima, debido a la poca cantidad en que es requerido. Como ion cuproso o cúprico forma parte de enzimas implicadas en procesos redox clave, como la plastocianina implicada en el transporte electrónico entre los dos fotosistemas, o la citocromo c oxidasa de la cadena respiratoria. Es componente también de la fenolasa que oxida fenoles durante la biosíntesis de lignina y, junto con el Zn, de la CuZn SOD mayoritaria en el citosol.
- Zinc (Zn). Como catión divalente está implicado en al menos 80 sistemas enzimáticos redox (NADH-deshidrogenasa, anhidrasa carbónica, alcohol deshidrogenasa). Forma parte de la CuZn SOD. También está implicado en la síntesis de triptófano, precursor de AIA, por lo que su deficiencia conduce a una falta de auxinas, con la disminución de la elongación.
- Molibdeno (Mo). En distintos estados de oxidación participa en reacciones redox formando parte de complejos enzimáticos clave como el de la nitrato reductasa, el de la xantina oxidasa (implicada en el catabolismo de bases púricas) o el de la nitrogenasa.
- Boro (B). En las plantas se encuentra en forma de ácido bórico H_3BO_3 o, gracias a la capacidad de este de captar grupos OH, como ion borato $B(OH)_4^-$. A pesar de ser establecida su esencialidad en 1923, es el micronutriente más desconocido. Se ha visto implicado en numerosos procesos fisiológicos pero aún no se conoce su papel primario. Puede formar enlaces éster con grupos cis-diol, de donde parece derivarse su función. Moléculas enlazadas por borato o por ácido bórico pueden ser funcionales gracias a estos enlaces éster, como ocurre con el dímero Borato-ramnogalacturonano II, un componente péctico de la pared celular y, muy probablemente, glucoproteínas de la membrana. Su deficiencia se manifiesta en necrosis de los meristemos apicales y su toxicidad en una rigidez y fragilidad excesiva de las paredes celulares.
- Sodio (Na). Se encuentra como anion monovalente y, aunque algunas plantas lo tienen en concentraciones muy elevadas (las halófitas) se ha demostrado su esencialidad sólo para las plantas C_4 y CAM, donde está implicado en la regeneración del fosfoenolpiruvato. Existe también un requerimiento para la fotosíntesis y otros procesos de cianobacterias.

Métodos de estudio de la nutrición mineral

El estudio de la nutrición mineral se realiza normalmente en cultivos hidropónicos y aeropónicos, que permiten controlar de forma precisa la concentración de los elementos minerales a estudiar el pH y mantener una alta concentración de oxígeno, especialmente en los aeropónicos.

Las curvas de crecimiento para cada elemento esencial muestran tres intervalos:

- Zona de deficiencia: apenas hay crecimiento de la planta y un pequeño aumento en la concentración del nutriente induce un aumento significativo del crecimiento de la misma.
- Zona de suficiencia: la planta mantiene un nivel óptimo de crecimiento y un aumento en la concentración del nutriente no produce ningún aumento en el crecimiento de la misma.
- Zona de toxicidad: Un aumento en la concentración del nutriente provoca una disminución del crecimiento de la planta. Muchos micronutrientes son tóxicos a concentraciones bajas.

Estas curvas permiten saber cual es la concentración idónea de cada elemento.

Diagnóstico de nutrición

La deficiencia o toxicidad de un elemento esencial provoca una disrupción en su funcionalidad. Para cada nutriente y especie se puede determinar su concentración crítica y su intervalo de suficiencia.

Algunas deficiencias causan síntomas visibles asociadas a cada elemento, pero atribuir estos síntomas a un elemento determinado no es totalmente preciso, ya que diferentes deficiencias pueden provocar el mismo síntoma, a veces por interacciones entre distintos elementos. Un método de estudio más preciso y muy utilizado es el análisis foliar. Además de este, el análisis de savia permite hacer un diagnóstico precoz de la nutrición.

Problemas medioambientales, fundamentalmente la salinidad y los metales pesados son los causantes de importantes alteraciones de la nutrición mineral, ya que muestran problemas de toxicidad por sí mismos e interfieren en el nivel de otros elementos esenciales.

Además de determinaciones colorimétricas clásicas, se han desarrollado otros métodos de análisis más finos, como la espectrometría de absorción atómica, de emisión de llama, plasma inducido, cromatografía líquida (HPLC) y la electroforesis capilar, que permiten medir variaciones, incluso del orden picomolar, de concentraciones de los diferentes elementos. El desarrollo de estas técnicas ha llevado a aumentar la lista de elementos esenciales para las plantas, como el Ni, ya que se encuentran a concentraciones óptimas tan bajas que no eran detectables hasta hace poco tiempo, y seguramente en un futuro se incorporarán otros elementos, sobre todo metales, a la lista de micronutrientes.

Algunas técnicas ayudan al estudio de disfunciones de algunos elementos.

Los estudios de microscopía son útiles para determinar deficiencias relacionadas con cambios estructurales.

Las técnicas bioquímicas permiten estudiar el estado nutricional de aquellos elementos esenciales para la síntesis o funcionamiento de ciertos enzimas.

Tratamiento de las deficiencias minerales. Aplicaciones agrícolas

La fertilización del suelo a cultivar ha permitido un gran aumento en la producción agraria.

La fertirrigación ha aumentado la eficiencia de la fertilización y disminuido alguno de sus problemas medioambientales.

La utilización de quelatos permite la estabilización de algunos elementos, que tienden a precipitar en disolución, permitiendo así su utilización por la planta.

Algunos nutrientes minerales, no disponibles en el suelo, pueden aplicarse directamente en las hojas.