



MICROELEMENTOS

Descripción de los Microelementos y su movimiento en la planta

Contenido

Introducción.....	3
La movilidad de los Microelementos.....	4
Microelementos.....	6
Calcio	6
Magnesio	9
Boro	12
Cobre.....	15
Hierro.....	18
Manganeso.....	22
Molibdeno	26
Zinc.....	27
Resumen	30
Soluciones ARTAL	32

Introducción

Los Microelementos o Micronutrientes son los elementos químicos que si bien no son requeridos por las plantas en cantidades elevadas para tener un crecimiento normal, su presencia mejora substancialmente el crecimiento del cultivo. Los Microelementos en plantas son los siguientes: Cloro (Cl), Hierro (Fe), Boro (B), Manganeseo (Mn), Magnesio (Mg), Zinc (Zn), Cobre (Cu), Molibdeno (Mo) y Níquel.

Los Microelementos participan en muchas de las actividades metabólicas de la planta de dos maneras principalmente:

- a) **Como cofactor enzimático.** Un cofactor enzimático es un elemento inorgánico que está unido a la estructura de las proteínas. La función de éste es la de servir de centro catalítico de la enzima (lugar donde la reacción metabólica se produce). Estas enzimas con cofactores participan en todo tipo de reacciones, desde reacciones de detoxificación de productos perjudiciales hasta la producción de moléculas en el organismo.
- b) **Como regulador de la homeostasis.** Algunos Microelementos, como el Cloro, participan activamente en la homeostasis de la planta. La homeostasis es el equilibrio de la planta con el medio, y se consigue debido a que la planta presenta mecanismos de relación con el ambiente que le permite sobrevivir a cambios en este, adaptándose. Procesos como la osmosis, la transpiración foliar... son procesos clave en esta regulación, y ciertos microelementos juegan un papel fundamental en estos.

Estos Micronutrientes son absorbidos de forma radicular por la planta de dos maneras diferentes.

- a) **Libres.** Las plantas pueden absorber los elementos de manera libre cuando estos están presentes en la forma iónica indicada. La mayor parte de los Microelementos pueden presentarse en el suelo, dependiendo del pH de este, en varias formas iónicas, y no todas pueden ser incorporadas a la planta directamente.

- b) **Complejados.** Los elementos presentes en el suelo que no están presentes en la forma iónica adecuada para su absorción radicular la planta secreta de manera natural ciertos compuestos como aminoácidos, vitaminas o fitosideróforos que se unen a los microelementos facilitando su absorción por parte de la planta. Cuando estos se aplican artificialmente, los productos fertilizantes suelen tener quelante artificiales, como el ácido etildiaminotetraacético (EDTA) o el ácido fídroxi-2-etilenodiaminotriacético (HEEDTA) que actúan facilitando la incorporación de los Microelementos.

Estos microelementos son encontrados en proporciones de entre 5-200 ppm hasta un 0.02% del peso seco de la planta.

La movilidad de los Microelementos

Una vez incorporados a la planta los microelementos se incorporan al tejido conductivo de las plantas. En primera instancia, todos los elementos absorbidos por vía radicular se incorporan al tejido xilemático, una especie de tubos huecos por los que el agua circula **siempre** en sentido ascendente. La fuerza de transporte en este sistema se basa en la evapotranspiración. El transporte a través del xilema funciona gracias a la propiedad de cohesión de las moléculas de agua, las cuales están unidas por enlaces del tipo **punto de hidrógeno**. Esta unión provoca que todo el líquido esté cohesionado, unido parcialmente. Al incidir los rayos solares en las hojas de la planta, el agua en estas estructuras se evapora, y por transpiración abandona las hojas, creándose una **presión negativa** (porque el agua abandona estas estructuras en forma de vapor) que hace que se produzca un efecto de succión desde las hojas a las partes inferiores.

El principio es el mismo que hace succionar una jeringuilla. Esta succión estira de toda la columna de agua en el xilema en dirección a donde se ha producido la presión negativa, en las hojas, lo que provoca un movimiento ascendente (de las raíces hacia las hojas) de toda la columna de agua xilemática junto con los nutrientes que contiene, entre ellos el Boro. Por ello el transporte a través de este sistema **siempre es direccional**, porque ni en las raíces ni en los tejidos jóvenes no se produce evapotranspiración.

Una vez en el xilema, los nutrientes van desde los órganos de absorción (raíces) hasta los lugares destino (las hojas). Aquí se produce un fenómeno llamado translocación. Este proceso transloca los nutrientes del sistema xilemático al floemático. Este sistema, a diferencia del xilema, se compone de células vivas con un metabolismo activo. En este caso el agua y los nutrientes son **transportados activamente**, por mecanismos de transporte basados en bombas metabólicas por lo que pueden ser transportados **independientemente de la evapotranspiración**. Al ser independiente, los nutrientes pueden dirigirse hacia los tejidos jóvenes. Esta translocación se puede producir de manera continuada o en momentos puntuales. Por ejemplo, al producirse los frutos estos tejidos en formación requieren de grandes cantidades de nutrientes, por lo que se produce un envío masivo desde los órganos fuente (las hojas, donde se acumulan los microelementos a espera de ser requeridos) a los órganos sumideros (los frutos en este ejemplo).

No todos los microelementos son capaces de realizar esta translocación xilema-floema, y dependiendo de esta capacidad clasificamos los microelementos en:

- a) **Móviles:** Estos microelementos pueden ser translocados desde los órganos fuente a los órganos sumidero cuando los requieren en grandes cantidades. El **Magnesio**, el **Cloro** y el **Sodio**, a parte de los macroelementos (**Potasio**, **Fósforo** y **Nitrógeno**) son clasificados como tal. Debido a esta capacidad de ser translocados pueden ser acumulados en los tejidos jóvenes.
- b) **Parcialmente móviles:** Estos microelementos presentan una movilidad condicionada, por ejemplo a la disponibilidad ambiental, a la temperatura, al estado metabólico... Se incluyen aquí en **Zinc**, el **Cobre**, el **Manganeso**, el **Hierro**, el **Molibdeno** y el **Azufre**. Pueden ser almacenados tanto en los tejidos jóvenes como viejos.

- c) **Inmóviles:** Estos elementos presentan una tasa de translocación muy reducida o nula, por lo que solo son transportados por vía xilemática. Esto hace que se acumulen en los tejidos más viejos. En esta lista se incluyen el **Calcio** y el **Boro**.

Microelementos

Calcio

El Calcio es un nutriente esencial para las plantas con numerosas funciones, entre las cuales destacan:

a) Promueve el alargamiento celular.

Este efecto está mediado por la participación del Calcio en el efecto de las auxinas, que son las hormonas encargadas de la elongación celular.

b) Toma parte en la regulación estomática.

Un estoma es un agujero en la epidermis foliar que regula el estrés hídrico en las plantas mediante u apertura o cierre. Las células guarda, que regulan la apertura o el cierre estomático, realizan esta función mediante su llenado o vaciado de agua: para abrirse se llenan de agua, adquiriendo turgencia, que se cierran cuando el agua abandona estas células. Este proceso de absorción de agua está mediado por el Calcio. Este elemento **favorece la oclusión estomática**: se une a unas proteínas especiales que permiten la entrada de iones de Potasio dentro de la célula (lo que por osmosis provoca la entrada de agua) y las inhibe, favoreciendo la salida del agua, cerrando los estomas.

c) Fortalece la estructura de la pared celular.

El calcio es una parte esencial de la pared celular de las plantas. Este forma compuestos de pectato de calcio que dan estabilidad a las paredes celulares de las células.

d) Ayuda a proteger la planta contra el estrés de temperatura alta.

El Calcio participa en la inducción de proteínas de choque térmico. Este elemento se une a unas proteínas especiales de la membrana celular que inician la respuesta celular anti estrés térmico. Una cantidad reducida de Calcio intracelular hace que la respuesta anti shock térmico sea más lenta, permitiendo que se produzca daño celular.

e) Ayuda a proteger la planta contra las enfermedades.

El Calcio participa en la defensa frente a estreses bióticos (infecciones fúngicas y bacterianas) por su papel como activador de la proteína **calmodulina**. Esta proteína media el reconocimiento de señales que indican que ciertos elementos no son propios de la planta sino de organismos externos, lo que permite al sistema inmune reconocerlos para aislarlos y eliminarlos. Sin la activación con Calcio este mecanismo no puede funcionar. Ciertas investigaciones demostraron que un nivel suficiente de calcio puede incrementar significativamente la actividad de estas enzimas y proteger las células de la planta de invasión de patógenos.

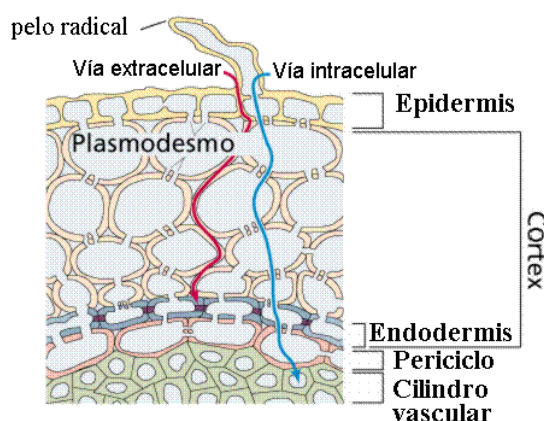
f) Afecta a la calidad de la fruta.

Los niveles de Calcio afectan directamente a la cantidad de azúcar, una mejor calidad y elasticidad de la piel del fruto (que impide las pérdidas de agua), un retraso en la senescencia (lo que permite poder almacenar la fruta más tiempo).

Movilidad del Calcio

El Calcio es el elemento más inmóvil de todos. Se adquiere a través de las raíces desde la solución del suelo por vía pasiva y activa. El mecanismo de transporte de Calcio libre hacia el xilema es en su mayor parte apoplástico hasta llegar a una zona especial de tejido, llamada **Banda de Caspary**, que no permite el flujo de Calcio libremente. Una vez llegado aquí, el Calcio entra en las células y el transporte pasa a ser simplástico. Parte del Calcio absorbido por las raíces es complejado, y este entra al xilema por vía simplástica directamente.

Al hablar de movimiento **simplástico** nos referimos a un tipo de transporte dentro de las plantas antes de llegar al tejido conductivo (xilema o floema) el cual se produce por vía **intracelular**, es decir, los compuestos se conducen entre las zonas de contacto entre dos células, entre las cuales se establecen unos canales por donde pasan los elementos transportados. Este término se contrapone al movimiento **apoplástico**, en el cual los elementos se conducen por el exterior de las células (la matriz extracelular).



Una vez dentro del xilema el Calcio sigue el movimiento ascendente típico consecuencia de la evapotranspiración. Una vez dentro del xilema es complejo con citrato o malato para su transporte. Al llegar a las hojas este Calcio es translocado al tejido vascular floemático a una tasa extremadamente baja, convirtiéndolo en un elemento inmóvil.

Esto se entiende si consideramos que el Calcio es un elemento de señalización de rutas metabólicas. Cuando las células detectan ciertas cantidades de Calcio inician procesos metabólicos precisos. Por ello este elemento solo puede ser transportado de manera xilemática, puesto que es un tejido formado por células muertas. Si elevados niveles de Calcio atravesaran el floema, formado por células vivas, estas morirían debido a que muchos procesos se estarían activando debido a la presencia de elevados niveles de Calcio. Por ello todo el elemento que llega a los tejidos es a través del xilema o a través del floema, sí se compleja. El flujo xilemático en dirección a los frutos corresponde solo al 17-24% del flujo total de agua, por lo que la cantidad de Calcio que llega a los frutos es muy pequeña.

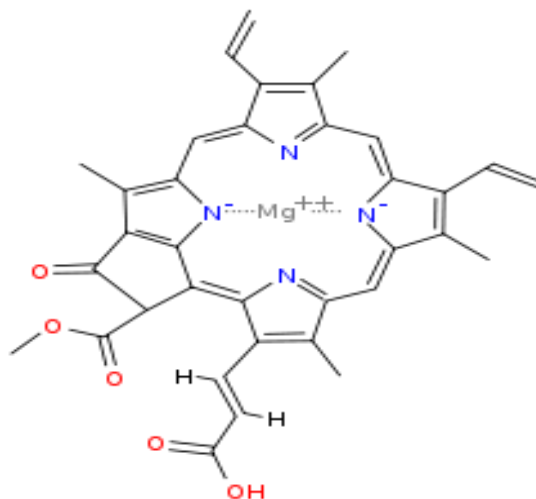
Así pues el correcto abastecimiento de Calcio a los tejidos jóvenes se produce siempre que haya una cantidad de Calcio disponible considerable. Si el Calcio total disponible es reducido, el mayor flujo xilemático hacia las hojas hará que estas se queden la mayor parte del Calcio, y este será del todo insuficiente para el correcto crecimiento de frutos y brotes nuevos. De producirse una deficiencia en este elemento los tejidos jóvenes no recibirán una cantidad suficiente de Calcio para su correcto crecimiento.

Magnesio

El Magnesio es un microelemento esencial en las funciones de la planta. Se trata de un átomo divalente, pero se encuentra mayoritariamente en la forma de Mg^{2+} . Los procesos en los que participa son claves en su mayoría:

a) Función fotosintética

El Magnesio es el átomo central del anillo de Nitrógeno de la clorofila



Este anillo, llamado **anillo de profirina**, es la parte de la molécula de clorofila que absorbe la luz para iniciar la fotosíntesis. Este anillo es la zona de la molécula de clorofila que se encarga de captar la luz y transmitir la energía con la que se inicia la fotosíntesis. Este elemento es requerido en las hojas para que sean fotosintéticamente activas.

A parte de esto, el Magnesio actúa como compensador de la acidez que se produce en el lumen tilacoidal (el interior de los orgánulos cloroplásticos donde se produce la fotosíntesis). Esta acidez se produce por el bombeo de protones (H^+) al lumen tilacoidal para provocar un gradiente de protones que activa la síntesis del ATP, pero un exceso de estos puede llevar el daño a las estructuras. Para compensar esta acidez la planta se sirve del Magnesio.

b) Función metabólica

El Magnesio en el metabolismo tiene un papel fundamental en varios aspectos de diversos procesos.

- 1- Para ser metabólicamente activo el ATP necesita de estar complejoado con Magnesio, formando complejos Mg-ATP.
- 2- El Magnesio es a su vez un activador enzimático y un constituyente inorgánico (cofactor) de muchas enzimas.
- 3- La síntesis de azúcar está mediada por muchas enzimas cuya actividad depende de Magnesio.
- 4- Los aceites esenciales y la formación de grasas son realizadas por enzimas dependientes de Magnesio.
- 5- Ayuda a la fijación del Nitrógeno por parte de los nódulos bacterianos en plantas con semilla.

Movilidad del Magnesio

El Magnesio, como la mayoría de los iones divalentes (por ejemplo el Calcio) entra a las raíces por vía apoplástica y simplástica, aunque los estudios demuestran que la incorporación apoplástica es mucho más rápida. Esta entrada a las raíces es activa, por lo que consume energía. Una vez incorporada a la raíz, el Magnesio se transporta hasta el xilema tanto por vía apoplástica como simplástica hasta llegar a la banda de Caspary, zona en la que todo el Magnesio entra a las células por transporte activo (consume energía), siguiendo una ruta simplástica hasta llegar al xilema. Una vez en el xilema, el Magnesio se conduce hasta las hojas por el transporte asociado a la evapotranspiración. Una vez llega a las hojas, el Magnesio puede o bien ser translocado al floema o bien ser almacenado en unos orgánulos celulares llamados vacuolas. Estas vacuolas son una especie de almacén celular el cual retiene microelementos (entre otras cosas) para tenerlos a disposición de la célula sin estar en su líquido intracelular (también conocido como citoplasma). Esto se debe a que los micronutrientes actúan como solutos en la homeostasis osmótica, y una elevada presencia de solutos en el citoplasma aumentaría mucho su presión osmótica, provocando una entrada masiva de agua pudiendo hacer reventar la célula. El otro camino que puede tomar el Magnesio es ser translocado al floema. Esta translocación se produce activamente, cuesta energía. Este elemento se dirige principalmente a las hojas en desarrollo, puesto que es un elemento clave en la síntesis de nuevas moléculas de clorofila. Es un elemento bastante móvil, y la translocación se produce sin demasiadas limitaciones.

Como la principal función de este elemento es fotosintética, los tejidos que primero la deficiencia son las hojas adultas, puesto que son las fotosintéticamente activas.

Boro

El Boro es un micronutriente requerido para la nutrición de plantas. La forma en la que es absorbido por las plantas es en forma de ácido bórico $[B(OH)_3]$.

Un adecuado abastecimiento de Boro es esencial para la correcta nutrición de los cultivos. Las deficiencias de Boro dan como resultado cambios en la anatomía, el metabolismo y la fisiología de las plantas.

Los procesos en los que el Boro participa son varios:

a) Fijación del Nitrógeno

El Boro es un elemento clave para que las **cianobacterias** (un tipo de bacteria que está en simbiosis con algunas plantas, como las legumbres) fijen el Nitrógeno atmosférico y se lo cedan a la planta, posibilitando así su incorporación al metabolismo. Además la producción de **nitritos** (NO_2^-), un compuesto intermediario en el metabolismo del Nitrógeno en plantas, por la enzima **nitrito reductasa** está mediada por Boro. Cuando hay una deficiencia de Boro la cantidad de Nitrógeno presente en la planta disminuye comprometiendo el normal desarrollo de la planta.

b) Estructura de la pared celular

El Boro participa en el movimiento del Calcio en la planta. El Calcio es un elemento clave para la estabilidad de la pectina (proteína estructural) en la pared celular. Una deficiencia de Boro provoca formas celulares anormales que **comprometen** el crecimiento normal y el **desarrollo de las raíces** y otras estructuras de la planta.

c) División celular

El Boro es un elemento importante para la división celular. Este proceso consiste en la escisión de una célula (célula madre) en dos (células hijas), incrementando la cantidad de células presentes en el organismo, haciéndolo crecer.

Este proceso ocurre con elevada frecuencia en tejidos que están creciendo, como los meristemas de las plantas. El Boro es acumulado en estos tejidos favoreciendo su crecimiento. Una deficiencia de este elemento conlleva a un crecimiento reducido, incluso detenido, de las estructuras de las plantas.

El retraso del crecimiento en las leguminosas es un síntoma típico de la deficiencia de Boro causado por una reducción del número de células en las regiones apicales de crecimiento.

d) Transporte de azúcares

El transporte de azúcares fotoasimilados producidos durante la fotosíntesis es mediado por Boro. Este elemento se compleja con los azúcares y permite que éstos salgan de las células productoras y que entren en las células objetivo (células de almacenamiento, raíces en crecimiento, frutas en desarrollo...)

El Boro incrementa la tasa de transporte de estos azúcares, y es importante porque si el azúcar se acumula en las células productoras la tasa fotosintética disminuye.

e) Florecimiento y formación de frutos

Los tejidos reproductivos requieren de mayores cantidades de azúcar para ser formados y mantenidos que cualquier otro tejido de la planta. El Boro es requerido para el transporte de azúcares y para la división celular, procesos requeridos para la formación de estos tejidos. La germinación también requiere de grandes cantidades de este elemento.

Una deficiencia de Boro puede causar una polinización deficiente de las flores porque el tubo polínico puede no formarse correctamente, disminuyendo la producción.

Movilidad del Boro

La deficiencia de Boro en la planta suele ser más acusada en los tejidos más jóvenes.

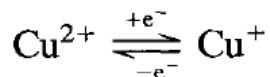
La incorporación del Boro a la planta por vía radicular se produce mediante la formación de complejos cis-diol a partir del **ácido bórico** en el suelo. La entrada a la planta por vía radicular es directa, por permeación, sin ayuda de quelatantes. Una vez dentro de la planta el Boro pasa al xilema. Este tejido conductivo de la planta está formado por células muertas por las que circulan agua y nutrientes disueltos en ella, por lo que no puede darse transporte activo (transporte asociado al metabolismo de las células vivas) sino que responde solo a transporte físico.

La translocación del Boro al floema es muy limitada, y depende sobretodo de una buena disponibilidad en los tejidos fuente (hojas). La forma en la que el Boro es translocado al floema es complejo con un azúcar del tipo **poliol** (sorbitol en la mayor parte de los casos). Debido a esto, al producirse una deficiencia en el suministro de Boro los primeros órganos que lo notan son los tejidos más jóvenes, porque este elemento no puede ser transportado desde los órganos fuente.

La importancia del sorbitol en la translocación es especialmente importante cuando se aplica Boro por vía foliar. Se ha demostrado que la translocación en las hojas de las plantas ricas en estos compuestos se produce en mayor medida que en las plantas donde estos compuestos son sintetizados en menor cantidad. Por ello la efectividad de los productos foliares ricos en Boro sobre las deficiencias en este microelemento depende de la planta.

Cobre

El Cobre es un microelemento cuya función en la planta es la de participar como coenzima en los procesos enzimáticos de reacción redox (ver apartado Manganese). Esto se debe a que el Cobre presenta dos estados iónicos, por lo que el elemento puede absorber o ceder electrones en esta reacción:



Este elemento toma parte en todo tipo de procesos enzimáticos

a) Papel fotosintético

El Cobre forma parte de la **plastocianina**, una molécula que participa en las reacciones de transporte electrónico (redox) en la fotosíntesis, sin la cual este proceso no es posible. Además, la síntesis de las **plastoquinonas**, otras moléculas que participan en estas reacciones de transporte electrónico, está mediada por enzimas que presentan Cobre en su estructura.

Así pues, una baja disponibilidad de Cobre reduce la fotosíntesis en las plantas.

b) Papel antioxidante

El Cobre es, junto con el Zinc, uno de los dos cofactores que forman la **CuZn-superóxido desmutasa**, una enzima que utiliza la capacidad de absorber electrones de estos dos compuestos para neutralizar los radicales libres de Oxígeno, un agente oxidante muy dañino para las células, y que se genera durante la fotosíntesis.

La deficiencia en Cobre hace que esta enzima se encuentre en niveles muy reducidos, por lo que los radicales no pueden ser neutralizados, y estos producen daño oxidativo provocando manchas necróticas en las hojas.

c) Papel metabólico

El Cobre es un elemento clave en la producción de carbohidratos y su procesamiento posterior.

Los niveles de **carbohidratos** (azúcares) en las plantas con deficiencia de Cobre son mucho menores y en consecuencia, el número de frutos producidos es mucho menor también.

Uno de los destinos de los carbohidratos es su conversión en celulosa, el elemento principal de la pared celular de las plantas, y lignina, un polímero de azúcares muy duro que se encuentra en los tejidos lignificados, como la madera. La deficiencia de Cobre hará que las células presenten paredes celulares deformes y las hojas tomarán formas anormales como dobladas o retorcidas. La cantidad de lignina en los troncos será menor también, exponiendo a las plantas a un mayor número de enfermedades y dándoles menos resistencia a estreses abióticos, como vientos fuertes.

d) Papel en la fertilización

El Cobre juega un papel clave en la viabilidad del polen producido por la planta. Durante la formación del polen (o microesporogenesis) la liberación del polen recién formado de las anteras depende de la correcta lignificación de un tejido de las anteras llamado tapete, que promueve el rellenado con nutrientes del polen. La lignificación cuando hay deficiencia de Cobre es reducida, incluso ausente, por lo que el polen no recibe nutrientes suficientes haciéndolo inviable. Al producirse polen inviable la fertilización es muy difícil y por ende, la producción de frutos se reduce drásticamente.

e) Tratamiento contra enfermedades

El sulfato de Cobre es un tratamiento generalizado para muchas enfermedades de todo tipo de plantas debido al poder estimulante del sistema inmune de este microelemento.

Movilidad del Cobre

El Cobre es un microelemento cuya incorporación radicular es muy reducida, principalmente porque forma complejos muy estables con las partículas de suelo. Así, las deficiencias en este microelemento pueden aparecer aunque el suelo tenga una riqueza moderadamente elevada, aunque hay una correlación positiva entre una mayor cantidad de Cobre en el y su absorción. Esta absorción es bastante independiente del pH del suelo.

El proceso de absorción de Cobre por la planta es tanto activo como pasivo. Esto quiere decir que el metabolismo de la planta juega un papel en su absorción. A parte de la difusión pasiva hacia el interior de las plantas, éstas presentan transportadores de Cobre sobre la superficie radicular, los cuales transportan este elemento hacia el interior de la planta. El transporte activo predomina ante bajas concentraciones de Cobre en el ambiente, mientras que la difusión pasiva es predominante ante altas concentraciones. La forma iónica incorporada es la Cu^{2+} .

Una vez incorporado, el Cobre viaja por vía xilemática complejo con los aminoácidos asparagina o histidina hasta las hojas, donde es translocado. La translocación se produce de una manera eficaz cuando la concentración de Cobre es adecuada, en un proceso asociado a la translocación del Nitrógeno. Pese a esto la cantidad de Cobre en las raíces siempre es superior que en las hojas.

Cuando se aplica por vía foliar, el Cobre es rápidamente absorbido por las plantas. En este caso ocurre algo similar a la absorción radicular: la cantidad de Cobre dentro de la hoja donde se aplica el producto siempre es mayor que en otras estructuras de la planta. Por ello este mineral se clasifica como **parcialmente móvil**, puesto que a pesar de ser translocado la concentración de éste siempre es más grande donde se absorbe que en el resto de la planta.

Hierro

El Hierro es un microelemento presente en la planta en dos formas iónicas, por lo que su importancia en las reacciones redox es muy grande:

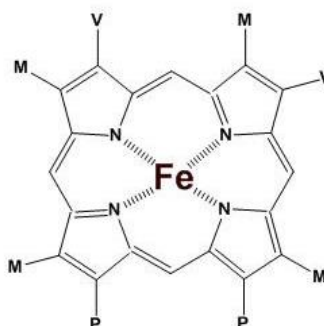


La forma 3+ la encontramos sobretodo en el xilema de la planta, pues es la forma en la que el hierro es transportado por los tejidos conductivos de la planta, mientras que la absorción radicular del Hierro por las raíces suele ser en la forma 2+.

Las funciones del Hierro en la planta, por su capacidad para ceder y recibir electrones, están relacionadas con los sistemas redox de la planta:

a) Proteínas Hemo

Éstas son proteínas con un anillo cíclico, en el medio del cual encontramos un átomo de Hierro.



La capacidad de absorber y ceder electrones del Hierro hace que estas proteínas sean clave en el transporte electrónico entre diversos elementos, en cadenas como la que produce ATP en la mitocondria. Las hemo-proteínas más famosas son los citocromos, los cuales transfieren electrones en las cadenas electrónicas de la fotosíntesis en el cloroplasto y de la síntesis de ATP en la mitocondria.

b) Acción antioxidante

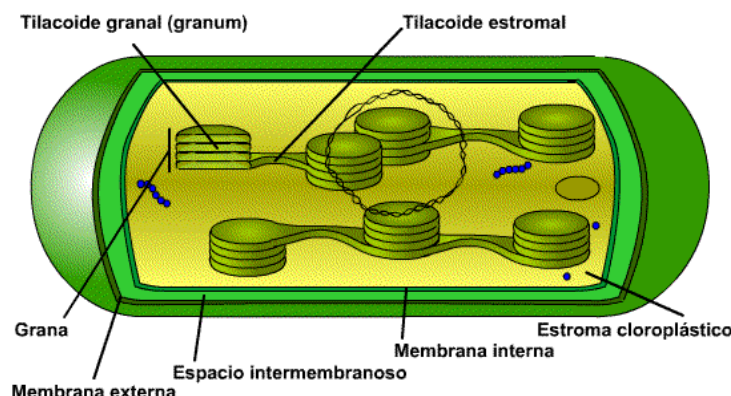
Las proteínas **catalasa** y **peroxidasa** llevan en su estructura química átomos de Hierro. Estas enzimas oxidan el agua oxigenada (H_2O_2) a agua y Oxígeno. El agua oxigenada es un producto del metabolismo de las plantas que es muy tóxico si no se desactiva mediante una reacción redox.

Otra función de las peroxidasas es la polimerización de los azúcares fenólicos para formar la lignina. Cuando hay una deficiencia de Hierro estos compuestos se acumulan al no ser polimerizados, resultando en unas plantas más endebles.

También hay una variante de la **superóxido desmutasa** cuyo cofactor es el Hierro, la Fe-superóxido desmutasa. Su función es la de desactivar los radicales libres de oxígeno absorbiendo sus electrones para volverlos inertes, no oxidantes, y preservar la célula del daño oxidativo.

c) Papel fotosintético

La fotosíntesis en las células vegetales tiene lugar en unos órganos intracelulares llamados **cloroplastos**. Dentro de estos cloroplastos hay unas estructuras en forma de sacos apilados llamados **tilacoides**, en la membrana de los cuales toma lugar el proceso de transferencia de electrones que dará lugar a la fotosíntesis. Todas las enzimas que participan en la fotosíntesis se encuentran embebidas en la membrana tilacoidal. Cerca de **20 átomos de Hierro** participan en la transferencia de electrones entre las diversas enzimas del proceso, por lo que la deficiencia de Hierro impide que la fotosíntesis se realice con normalidad y con rapidez.



Estructura de un cloroplasto.

Además la **síntesis de clorofila** depende del Hierro. La deficiencia de Hierro provoca una clorosis grave en la planta, y la clorosis se produce como consecuencia de unos niveles bajos de clorofila. Al ser la clorofila el pigmento que inicia la fotosíntesis, sumando estas consideraciones con las anteriores se puede decir que el Hierro juega un papel fundamental en el rendimiento fotosintético de la planta. La deficiencia de este elemento hará que la producción de azúcares fotosintéticos presentes en la planta disminuya drásticamente, y como cantidad de azúcares presentes en los frutos y de almidón en los granos disminuirá drásticamente.

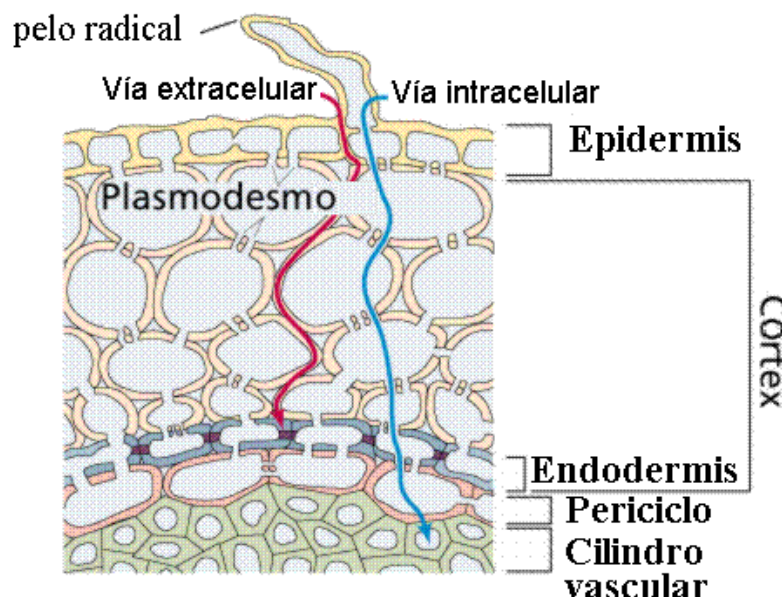
d) Papel en la fertilización

El etileno es la hormona que regula la madurez de los frutos y su precursor es el aminoácido metionina. En el metabolismo de conversión de este aminoácido a etileno, un paso enzimático depende del Hierro, que de ser deficiente hará que los niveles de etileno sean mucho menores, retardando la madurez del fruto.

Movilidad del Hierro

El Hierro es un elemento que, pese a ser muy abundante en la corteza terrestre, su disponibilidad para las plantas es muy reducida debido a que su absorción dispone del estado redox (el pH) del suelo. La forma en la que se absorbe el Hierro es en la forma $2+$, el cual está presente de manera reducida en la solución del suelo. Para solucionar esta falta de Hierro disponible las plantas emiten unos quelatantes naturales, los **fitosideróforos**, que se unen al Hierro $^{3+}$ lo que permite incorporar el elemento a la planta. Esta solución es cara desde el punto de vista energético, debido a que sintetizar los fitosideróforos consume mucha energía.

Otra manera de introducir el Hierro dentro de la planta es por vía apoplástica. Esta vía implica la entrada del elemento directamente al xilema, sin pasar primero por las células de las raíces. El proceso de entrada es desconocido, solo se sabe que intervienen en él unos compuestos fenólicos (cargados negativamente) que la planta libera al suelo, pero depende de la concentración de Hierro en la planta: cuando hay deficiencia, la entrada se produce por vía simplástica (primero el elemento entra dentro de las células radiculares, antes de incorporarse al xilema).



Una vez incorporada al xilema el Hierro se quela con **citrato o nicotiamina**, lo que evita su precipitación en la saba (líquido) xilemática. Aquí el Hierro es transportado desde las raíces a las hojas superiores. Una vez translocado, el movimiento del Hierro en la planta depende mucho de las necesidades de este elemento en los diferentes tejidos. La necesidad de Hierro hace que se expresen determinados tipos de genes que atraen el Hierro a las zonas donde se expresan, por vía floemática principalmente. Un buen ejemplo de este caso son las flores y semillas. En estas se sobre expresan los genes YSL1 e YSL3, que atraen el Hierro a estas estructuras, sin el cual se producirían estructuras no viables.

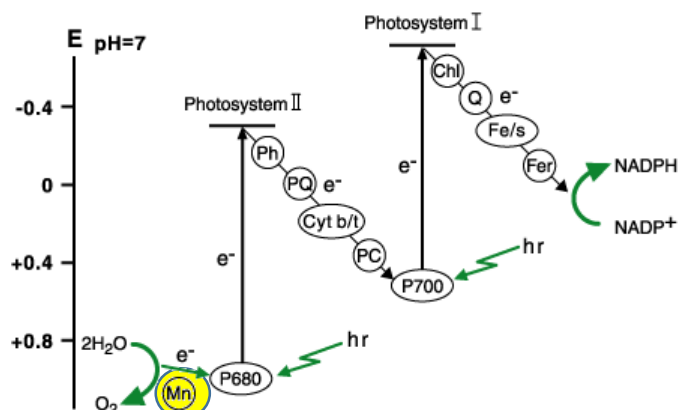
Manganeso

El Manganeso es un microelemento clave en el desarrollo de las plantas. Es absorbido por las plantas en la forma iónica Mn^{2+} .

El Manganeso es un elemento importante para mantener el metabolismo y la producción de azúcar en buen estado. Este elemento juega papeles importantes en varias rutas metabólicas, pero su función principal es la formación de la **mangano-proteína** que permite realizar la fotosíntesis. El Manganeso presenta varias funciones metabólicas:

a) Función fotosintética

La fotosíntesis empieza cuando una molécula de agua (H_2O) se escinde en sus elementos, Hidrógeno y Oxígeno. Los electrones liberados de la escisión del agua son los elementos que inician la cadena de reacciones de la fotosíntesis. La rotura de la molécula de agua es llevada a cabo por una proteína que contiene cuatro átomos de Manganeso. Estos átomos de Manganeso son los que rompen la molécula de agua, por lo que la fotosíntesis no es posible sin Manganeso disponible.



Esquema de las reacciones fotosintéticas. La primera reacción incluye Manganese (Mn) como el iniciador de todo el proceso.

b) Sistemas enzimáticos redox

Algunos elementos pueden donar electrones a otros elementos. Estos **electrones** son cargas negativas, así que al darlas, el **donante** da cargas negativas y como resultado se **carga positivamente**, volviéndose un **cation**. El elemento que **recibe** los electrones donados se **carga negativamente** convirtiéndose en un **anión**. Esta clase de reacciones con transferencia de electrones son llamadas reacciones redox. La función de estas reacciones es la de dar a elementos específicos cargas específicas que los hagan aptos para reaccionar en el metabolismo ya que algunos elementos sólo pueden participar en el metabolismo con una carga específica.

El Manganese se encuentra en la proteína en la forma de Mn³⁺, y puede recibir electrones convirtiéndose en Mn²⁺. Esta habilidad hace importante a este elemento para algunas enzimas como la **manganese-superóxido desmutasa**, que previene el daño oxidativo (daño provocado por radicales libres de O₂⁻) neutralizando las cargas negativas del Oxígeno recibiendo sus electrones.

c) Crecimiento en plantas

El Manganese es un microelemento que participa en varios procesos enzimáticos involucrados en el crecimiento vegetal. Las mangano-enzimas regulan el efecto hormonal en la formación de nuevos tejidos desactivando las hormonas cuando su acción ya no es necesaria o cuando la concentración de estas hormonas ha de ser regulada.

d) Síntesis de compuestos

El Manganese participa en la síntesis de elementos clave para la planta. El metabolismo de ácidos grasos, una de las formas en las que las plantas almacenan energía, está regulada por Manganese y los niveles de ácidos grasos se ven reducidos cuando una deficiencia de este elemento es sufrida por la planta.

Además la síntesis de lignina y los ácidos fenólicos está modulada por Manganese. Estos compuestos actúan directamente en los mecanismos antipatógenos de la planta. La lignina es un polímero de glucosa que endurece los troncos de los árboles, dificultando la entrada de los patógenos dentro del árbol. La madera es dura porque tiene presentes elevados niveles de estos polímeros en su estructura, así que una buena cantidad de lignina ayuda a las plantas a evitar una infección. Los ácidos fenólicos previenen la infección por vías metabólicas, no físicas.

Movilidad del Manganese

La forma en la que este elemento entra en las raíces de la planta es Mn^{2+} . La forma de entrada es tanto libre como formando complejos con compuestos orgánicos, como las sideraminas, que si bien presentan una alta afinidad por el Hierro también presentan efecto quelatante sobre el Manganese. Algunos aminoácidos también presentan este efecto quelatante. Las bacterias simbióticas en las raíces mejoran la absorción radicular de este elemento en gran medida. La planta además acidifica el medio liberando protones como manera de resolubilizar el Manganese precipitado en el suelo y poder absorberlo.

Este elemento presenta mucha afinidad por las raíces, por lo que su penetración se produce con mucha facilidad.

Una vez en el xilema, este elemento puede complejarse (con citrato en su mayor parte) o moverse libremente. El elemento entonces comienza el movimiento ascendente debido a la fuerza provocada por la evapotranspiración.

Por lo que respecta a la translocación, es complicada. Los estudios sugieren que una vez alcanzadas las hojas, el Manganeseo no puede ser translocado y se queda en la hoja a la que llega, por lo que la translocación se produce en otros órganos, como el tallo o las raíces. Por ello los órganos reserva principales del Manganeseo son estos tejidos. Esto se entiende al comprender que el principal sitio de reserva de este elemento son los cloroplastos, los cuales están muy desarrollados y presentes en un gran número en las hojas donde está “secuestrado”, cosa que no ocurre en los tejidos no fotosintéticos, como las raíces y los tallos. Por ello, la cantidad de Manganeseo en el floema depende directamente del aportado por los tejidos no fotosintéticos. En el floema el Manganeseo se encuentra en forma mayoritariamente libre. Esta diferente movilidad del Manganeseo en la planta hace que se clasifique como parcialmente móvil.

Las reservas de este elemento se encuentran en las raíces debido a que es la zona que más exporta este elemento donde se requiere, y es la zona donde primero afecta la deficiencia de producirse.

Molibdeno

El Molibdeno es un microelemento muy minoritario en las plantas, estas lo requieren en cantidades muy reducidas. En las plantas podemos encontrar este elemento en diversos estados redox: Mo^{6+} , Mo^{5+} y Mo^{4+} .

El papel de este elemento en las plantas se reduce a formar parte de unas pocas enzimas, pero importantes para el metabolismo

a) Nitrogenasa

El papel de esta enzima es la fijación de Nitrógeno atmosférico en las bacterias simbióticas presentes en las plantas, especialmente en las leguminosas.

Estas bacterias viven en las raíces de las plantas, por lo que el requerimiento de Molibdeno para esta enzima es sobretodo radicular. Para las plantas donde el Nitrógeno atmosférico fijado es una parte importante del Nitrógeno total de la planta, como ocurre en leguminosas, una buena disponibilidad de Molibdeno llevará a una estimulación del crecimiento cuando este elemento sea limitante. Pudiera darse el caso que en cultivos de leguminosas se pudiera reemplazar los fertilizantes nitrogenados por fertilizantes con Molibdeno.

b) Nitrato reductasa

Esta enzima reduce los nitratos a los nitritos en el metabolismo del Nitrógeno. Esta reacción es clave para la asimilación del Nitrógeno, y su importancia depende de la manera en la que este elemento es suministrado a las plantas. Si las plantas son fertilizadas con Nitrógeno amoniacal o ureico la importancia de esta enzima no es clave en el metabolismo ya que el Nitrógeno se encuentra reducido ya, pero si se fertiliza con nitritos, el crecimiento de la planta se ve muy limitado ante la ausencia o deficiencia de Molibdeno.

c) Efectos en la floración

El Molibdeno influye de manera notable en la formación de los granos de polen, en la floración y la apertura floral.

Movilidad del Molibdeno

El Molibdeno es absorbido por las plantas en forma de molibdato (MoO_4^{2-}), el cual es absorbido por las raíces. Los mecanismos de incorporación de este elemento a la planta son desconocidos, pero su transporte se produce tanto por floema como por xilema.

Una de las principales funciones del Molibdeno es en la formación de la Nitrogenasa de las bacterias simbióticas que se encuentran en las raíces. Éstas se encuentran aisladas en unos nódulos, y el Molibdeno ha de llegar dentro de estos nódulos. Esto se produce por la presencia de transportadores embebidos en la membrana peribacteroide, la capa que cubre el nódulo.

Zinc

El Zinc es un micronutriente mineral importante para el metabolismo general de la planta. Solo es absorbido por la planta en la forma iónica Zn^{2+} .

Su papel principal es formar parte de las enzimas como cofactor, una parte inorgánica de la enzima (orgánica) que es clave para la función metabólica de la enzima. Es el único elemento que actúa como cofactor de los 6 tipos diferentes de enzimas que existen: oxidoreductasas, transferasas, hidrolasas, liasas, isomerasas y ligasas.

La deficiencia más común que un cultivo puede padecer es la de Zinc, especialmente en suelos básicos debido a que la presencia de protones en los suelos ácidos facilita su absorción por la planta.

La producción de proteínas se ve muy reducida cuando la planta sufre una deficiencia de Zinc. Esto se debe a que este elemento juega un papel estructural muy importante en la estabilidad de los **ribosomas**, la molécula encargada de sintetizar las proteínas. Además de esto, la estabilidad del ARN, la copia metabólica del ADN de donde los ribosomas sacan la información para sintetizar una proteína, depende del Zinc, hecho que acentúa la reducción en la síntesis proteica. Una menor síntesis de proteínas afecta a las plantas en muy diversos niveles: creación de estructuras (hojas, frutos...), en el metabolismo (las enzimas son proteínas que ponen en marcha el metabolismo), en los mecanismos de defensa anti estrés (tanto biótico como abiótico).

Las funciones del Zinc en la planta comprenden:

- Protección de las células contra el daño oxidativo, participando como cofactor (junto con el Cobre) en la enzima **superóxido desmutasa**.
- Producción de **auxinas** y **giberelinas**, hormonas esenciales para el desarrollo y la formación de raíces.
- Conservación de la clorofila durante periodos de estrés, manteniendo la fotosíntesis activa en periodos desfavorables.
- Mantenimiento de la estabilidad de la membrana celular.

Movilidad del Zinc

El Zinc es absorbido a través de las raíces de la planta, como ocurre con la mayor parte de los microelementos. Este es absorbido desde la solución del suelo en forma de Zn^{2+} , el cual es incorporado por vía simplástica exclusivamente (a través de las células radicales hacia el xilema). Esto es debido a que el tejido endodérmico de la planta bloquea el paso apoplástico (ver el apartado Hierro). Una vez incorporado al xilema, el elemento se compleja con algún elemento (citrato en la mayoría de los casos), el Zinc va muy rápidamente a las hojas por el movimiento ascendente de la columna de agua provocado por la evapotranspiración, pero en el proceso, debido a su rapidez, han de intervenir otros procesos aunque no está claro cuáles son estos mecanismos.

Al llegar a las hojas, el Zinc es un producto que se **transloca** hacia el floema a una tasa que depende de la cantidad de Zinc presente en la planta, aunque suele ser bastante alta. Las zonas de acumulación principal de este microelemento son en los tejidos reproductivos (semillas y flores) y jóvenes, que sirven como reservorio, por ello ante situaciones de deficiencia los primeros órganos que lo notan son las hojas más viejas.

Resumen

Como se ha comentado en el análisis pormenorizado de los microelementos, éstos son unos componentes clave en la biología de la planta. Intervienen en procesos clave en la supervivencia de la planta y en la calidad de la producción:

a) Metabolismo

La eficiencia del metabolismo de las plantas depende en gran medida de una buena disponibilidad de microelementos. Todos los procesos metabólicos funcionan gracias a la acción de las denominadas enzimas, y los microelementos permiten que éstas actúen de la forma más eficiente. Procesos como la síntesis de azúcar, la formación de nuevos tejidos o la respuesta inmune ante infecciones son efectuadas por enzimas que requieren de ciertos microelementos, sin los cuales su función está comprometida.

b) Fotosíntesis

Un proceso central en las plantas es la fotosíntesis. Ésta convierte el Carbono inorgánico en azúcares los cuales se utilizan como fuente de energía para la propia planta o para exportarlos a los frutos. La calidad de la producción tiene mucho que ver con la calidad de la actividad fotosintética. Ciertos microelementos, como el Magnesio o el Manganeso, son claves en este proceso.

c) Homeostasis

Las plantas viven en un entorno cambiante al cual se tienen que adaptar. Esta adaptación (u homeostasis) conlleva procesos como el cierre estomático o la síntesis de compuestos que evitan la desecación, la congelación... Todos estos procesos están influidos por microelementos en mayor o menor medida.

d) Actividad microbiológica

Los microorganismos presentes en el suelo ayudan a descomponer la materia orgánica presente, dejándola perfectamente disponible para ser absorbida por la planta. Estos organismos, como el resto, necesitan de microelementos para realizar su importante función por las mismas razones que las plantas. Además, en las plantas que contienen micorrizas (simbiosis entre bacterias y las raíces de las plantas), las bacterias presentes requieren de microelementos como el Molibdeno para ciertas enzimas que asimilan el Nitrógeno para cedérselo a la planta.

Soluciones ARTAL

Este artículo se ha centrado en remarcar la importancia de los microelementos para un correcto desarrollo de la planta. La deficiencia en cualquiera de los microelementos conllevará un peor estado y producción de las plantas, por lo que un buen suministro de estos microelementos permitirá que estos no sean limitantes de la producción. ARTAL presenta varias líneas de productos que permitirán que el cultivo reciba la dosis óptima de cada uno de los microelementos que necesitan:

MICROPONIC

MICROPONIC es un quelato de microelementos (Boro, Cobre, hierro, Manganese, Molibdeno y Zinc). Es un corrector de carencias cuya amplia variedad de microelementos asegura una mejora en la producción en cultivos que presenten algún tipo de deficiencia de microelementos.

Los microelementos están quelatados con el agente HEEDTA, excepto el Boro y el Molibdeno que está presentes en forma inorgánica soluble en agua. El producto es de reacción ácida, por lo que es perfectamente asimilable por las plantas una vez aplicado en el suelo.

Se recomienda la aplicación de este producto durante todo el ciclo vegetativo, aunque con especial énfasis cuando la planta requiere de la activación del metabolismo enzimático, por ejemplo durante la germinación o la producción de frutos.

MICROPONIC está recomendado para todo tipo de cultivos, tanto frutales (pepita y hueso), como cítricos, hortalizas, cereales y ornamentales.

Su aplicación puede ser tanto foliar como radicular debido a su fórmula completamente asimilable por las plantas.

Las concentraciones garantizadas de los elementos de este producto son:

ELEMENTO	CONTENIDO GARANTIZADO
Boro	0,65% p/p = 0,9% p/v
Cobre	0,4% p/p = 0,55% p/v
Hierro	3,55% p/p = 4,93% p/v
Manganeso	2,5% p/p = 3,47% p/v
Molibdeno	0,05% p/p = 0,07% p/v
Zinc	3,12% p/p = 4,34% p/v
Líquido Soluble	---

Línea FLOWAL

Los productos **FLOWAL** son quelatos y complejos simples de microelementos (Calcio, Zinc, Magnesio, Manganeso y Hierro) quelados con ácido heptagluónico o con HEEDTA. Son correctores de carencias de microelementos que funcionan en amplios rangos de pH del suelo.

Línea NUTRIARTAL

Los productos **NUTRIARTAL** son complejos de microelementos que contienen Manganeso y Zinc. Además pueden contener Hierro (**NUTRIARTAL HIERRO**) o Magnesio (**NUTRIARTAL MAGNESIO**). Actúan como fuentes de Zinc y Magnesio para evitar carencias que perjudiquen la producción.