



UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO

Inicio

Curso

Examen

Contacto

Nutrición Mineral

NUTRICION MINERAL

La práctica de agregar elementos minerales al suelo para mejorar el crecimiento de las plantas se ha llevado a cabo desde hace más de 2000 años. Desde el siglo pasado Justus von Liebig (1803-1873) demostró la importancia de los elementos minerales para el crecimiento vegetal y a partir de sus trabajos, la nutrición mineral fue considerada como una disciplina científica. De esta manera, a finales del siglo XIX, sobre todo en Europa, grandes cantidades de potasio, superfosfato y nitrógeno inorgánico fueron usados en la agricultura para mejorar el crecimiento y rendimiento de los cultivos.

El contenido mineral de las plantas está afectado por factores externos y su composición porcentual en los cultivos varía considerablemente. Los datos de composición de las plantas (figura 1) han sido a veces erróneamente empleados para formular los programas de fertilización, siguiendo la idea de que las cantidades de elementos extraídos por los cultivos deben ser las cantidades remplazadas por los fertilizantes. Esta aproximación ignora factores tan importantes como las pérdidas por lavado, la fijación en el suelo en formas no asimilables de ciertos elementos, eficiencia de varias plantas en la absorción de ciertos elementos, y otros muchos.

| Composición elemental aproximada de un tejido vegetal | | |
|---|---------|--------------------------|
| Elemento | Símbolo | Porcentaje del peso seco |
| Carbono | (C) | 45,0 |
| Oxígeno | (O) | 45,0 |
| Hidrógeno | (H) | 6,0 |
| Nitrógeno | (N) | 1,5 |
| Potasio | (K) | 1,0 |
| Calcio | (Ca) | 0,5 |
| Magnesio | (Mg) | 0,2 |
| Fósforo | (P) | 0,2 |
| Azufre | (S) | 0,1 |
| Cloro | (Cl) | 0,01 |
| Hierro | (Fe) | 0,01 |
| Manganeso | (Mn) | 0,005 |
| Zinc | (Zn) | 0,002 |
| Boro | (B) | 0,002 |
| Cobre | (Cu) | 0,0006 |
| Molibdeno | (Mo) | 0,00001 |

Figura 1. Valores aproximados del contenido elemental de un tejido vegetal.

Las plantas tienen una capacidad muy limitada para seleccionar los elementos minerales que le son esenciales para su crecimiento y desarrollo y en muchas ocasiones introducen elementos minerales que no le son necesarios y que en algunas ocasiones hasta le resultan tóxicos. Por esta razón, la composición mineral de una planta no puede ser utilizada para establecer la esencialidad de un elemento.

El término elemento esencial mineral (o nutriente mineral) fue propuesto por Arnon y Stout en 1939. Estos autores concluyeron que para que un elemento sea considerado como esencial debe cumplir con lo siguiente:

- 1.- El elemento es necesario para el óptimo crecimiento y desarrollo de la planta y su ausencia o deficiencia en el suelo provoca en la planta un síntoma característico.
- 2.- El elemento en la planta no puede ser substituido por ningún otro elemento.
- 3.- El elemento debe estar directamente involucrado en el metabolismo de la planta.

Los elementos esenciales son: carbono, hidrógeno y oxígeno que provienen del aire y del agua del suelo. Además de: nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, azufre, magnesio, hierro, cobre, zinc, manganeso, molibdeno y boro que son suministrados a la planta a partir de las reservas del suelo o mediante la aplicación de abonos y fertilizantes.

Muchas especies han demostrado que les resulta benéfica la presencia de cloro, cobalto, silicio, sodio, níquel, aluminio, yodo y posiblemente vanadio, pero estos no se consideran nutrientes esenciales.

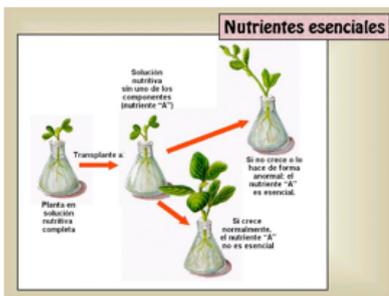
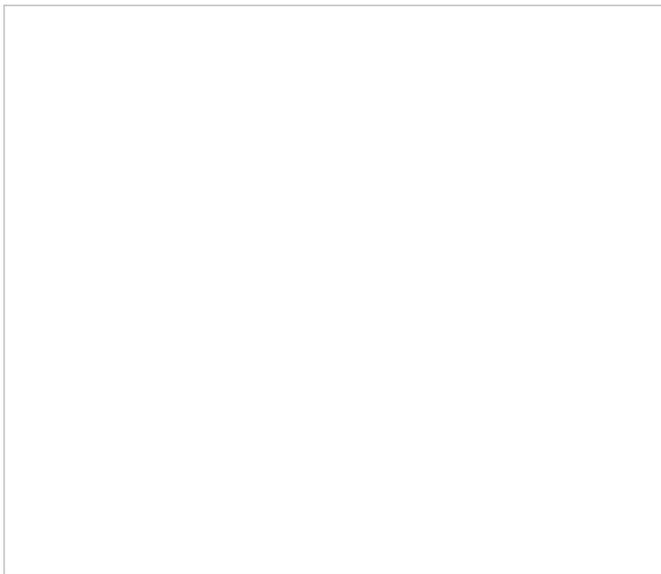


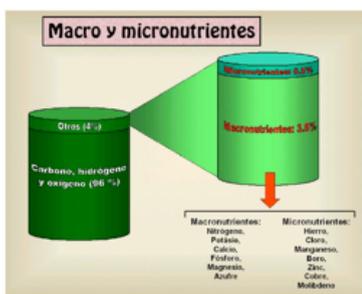
Figura 2. Experimento sencillo para determinar la esencialidad de un elemento

CLASIFICACION DE LOS ELEMENTOS

En una clasificación de los nutrientes un tanto arbitraria (figura 3), el nitrógeno, fósforo y potasio considerados como macronutrientes, se les denomina nutrientes primarios, mientras que el magnesio, calcio y azufre también macronutrientes, se les llama nutrientes secundarios.



Son considerados como macronutrientes porque se acumulan en la planta en cantidades considerables. El fierro, cobre, zinc, manganeso, molibdeno y boro se encuentran en la planta en cantidades mucho menores que los macronutrientes y se les conoce como micronutrientes u oligoelementos. Esta difundida clasificación de los nutrientes según su abundancia en la planta tiene una validez relativa ya que no son pocos los casos en los cuales algunos macronutrientes pueden encontrarse en cantidades menores que ciertos micronutrientes.



Los nutrientes de la solución del suelo provienen de muchas fuentes, tales como disolución de los materiales primarios, descomposición de la materia orgánica, aplicación de fertilizantes, etc. Una vez que está en solución, un nutriente puede sufrir muchas y variadas reacciones.

Los elementos químicos que actúan como nutrientes forman parte de biomoléculas estructurales o reguladoras, o actúan como cofactores de enzimas o en la regulación de los potenciales osmóticos. La acción de los micronutrientes se ejerce principalmente en la catálisis enzimática, ya sea como cofactores o como componentes de enzimas.

ABSORCION DE LOS NUTRIENTES.

Las plantas suelen absorber los nutrientes por las raíces, aunque también pueden absorber alguna cantidad a través de las hojas si se aplican en solución (fertilización foliar). Los nutrientes entran a la planta en forma de iones, partículas ultramicroscópicas que

llevan cargas eléctricas. Cuando los iones tienen cargas eléctricas positivas se llaman cationes; calcio (Ca^{++}), potasio (K^+), amonio (NH_4^+), magnesio (Mg^{++}). Los iones con cargas eléctricas negativas se llaman aniones e incluyen; fosfato (H_2PO_4^- o $\text{HPO}_4^{=}$), el nitrato (NO_3^-) o el sulfato ($\text{SO}_4^{=}$).

La mayor parte de la absorción de agua se produce cerca de los meristemos apicales de las raíces, en los pelos radicales, sin embargo, los nutrientes entran a la planta en una zona entre la región meristemática y la zona de pelos radicales. Esta zona se caracteriza por una incipiente diferenciación celular donde aún no está plenamente diferenciada la endodermis.

Transporte y distribución de los nutrientes.

El transporte de nutrientes en la planta puede ser de dos maneras; transporte de nutrientes larga distancia y transporte de nutrientes corta distancia.

Transporte larga distancia.- Este tipo de transporte se lleva a cabo a través del apoplasto, es decir, a través del espacio libre aparente en la planta.

La pared celular, los espacios intercelulares y los vasos xilemáticos constituyen el apoplasto (*espacio libre aparente*) y es en este conjunto de espacios que los nutrientes circulan en forma pasiva y libre. La entrada o salida de los iones depende de un gradiente de difusión, es decir que las sales se van moviendo según las diferencias de concentración que hay entre un punto y otro.

El movimiento de solutos de bajo peso molecular como son: iones minerales, ácidos orgánicos y aminoácidos, se lleva a cabo por difusión o por un flujo de masas y no es restringido por la superficie externa de las raíces (células de la rizodermis). Los iones van ocupando los espacios en las paredes celulares y los espacios intercelulares de las células de la corteza. Los iones van avanzando al interior de la raíz siguiendo un gradiente de concentración, van siempre de un punto de mayor concentración a otro de menor.

Este movimiento de solutos en la raíz es un proceso no metabólico, es decir, un proceso pasivo. Al llegar a la endodermis se encuentran con la banda de Caspary que es impermeable y para poder entrar al citoplasma celular (simplasto), algunos de ellos deben gastar energía metabólica, constituyendo de esta manera una absorción activa.

Transporte corta distancia.- Este tipo de transporte de nutrientes en la planta, ocurre a través de la membrana celular y puede ser un transporte sin gasto energético, (transporte pasivo) o bien, utilizando energía en forma de ATP (transporte activo).

La energía que permite la absorción activa procede de la oxidación de substratos orgánicos a partir de la respiración, por lo que en este tipo de reacciones es utilizado el oxígeno. La absorción activa promueve un aumento de la concentración de iones en el citoplasma celular hasta niveles muy superiores que los del exterior, y esto se debe al gasto energético que realiza la planta, pues se absorben iones en contra del gradiente de concentración.

En el transporte activo de los iones intervienen unas sustancias específicas llamadas transportadores (*carriers*) las cuales se encuentran incrustadas en las membranas de las células.

Existen dos teorías que tratan de explicar la absorción de iones minerales con el uso de transportadores; la teoría de la bomba de citocromos y otra en la que se utiliza energía proveniente del ATP. La teoría de la bomba de citocromos explica la absorción activa de los aniones, la cual es independiente de la absorción de los cationes. La bomba de citocromos es una cadena de reacciones de oxidación-reducción (pérdida y ganancia de electrones respectivamente), que transporta el anión desde el exterior y lo deposita en el interior de la célula.

La segunda teoría explica como los aniones y cationes son tomados por un fosfolípido, como la lecitina, que por una enzima específica (la lecitinasa) se hidroliza eliminando los aniones y cationes, que había tomado, hacia el interior de la célula. Posteriormente la lecitina hidrolizada pasa a lecitina nuevamente, resintetizándose nuevamente con un gasto de energía proveniente del ATP.

Para que exista una buena absorción de iones, la raíz debe respirar y para ello el suelo deberá tener una excelente aireación. Todos los factores que favorecen la respiración de la planta favorecen en última instancia la absorción de los iones minerales. La oxigenación del suelo resulta importantísima en la nutrición y en la fertilización de la planta. Una buena práctica cultural del suelo garantiza una buena aireación.

Los suelos con arcillas sódicas no tienen una buena estructura y por lo tanto el oxígeno existente en ellos es pobre. Al agregar calcio a ese tipo de suelos se produce un mejoramiento de los mismos pues los compuestos del suelo pueden agregarse y estructurarse de una manera que se permite la formación de poros y microporos.

Transporte y distribución de los nutrientes.

Las sales inorgánicas absorbidas por la raíz en forma de aniones y cationes, son transportadas por el xilema en forma ascendente junto con el agua. En esta corriente ascendente del xilema también se produce una difusión lateral de los nutrientes hacia el floema, que transporta sustancias orgánicas. Cuando los nutrientes llegan a las células de las hojas se combinan con las sustancias orgánicas y se mueven hacia arriba y hacia abajo, a los distintos órganos de la planta a través del floema.

Algunos iones como el fósforo, el azufre y el nitrógeno pueden combinarse en la raíz con sustancias orgánicas ingresando directamente a los conductos floemáticos.

La bicapa lipídica de la membrana actúa como una barrera que separa dos medios acuosos, el medio donde vive la célula y el medio interno celular. Las células requieren nutrientes del exterior y deben eliminar sustancias de desecho procedentes del metabolismo y mantener su medio interno estable. La membrana presenta una permeabilidad selectiva, ya que permite el paso de pequeñas moléculas, siempre que sean lipófilas, pero regula el paso de moléculas no lipófilas.

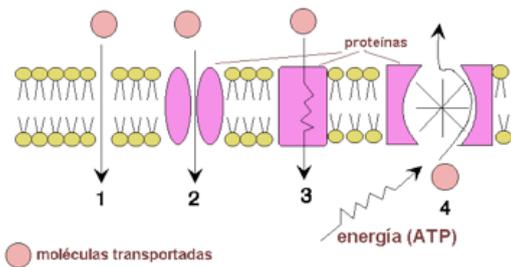
El paso a través de la membrana posee dos modalidades: Una pasiva, sin gasto de energía, y otra activa, con consumo de energía.

El transporte pasivo. Es un proceso de difusión de sustancias a través de la membrana. Se produce siempre a favor del gradiente, es decir, de donde hay más hacia el medio donde hay menos. Este transporte puede darse por:

Difusión simple a través de la bicapa (1). Así entran moléculas lipídicas como las hormonas esteroideas, anestésicos como el éter y fármacos liposolubles. Y sustancias apolares como el oxígeno y el nitrógeno atmosférico. Algunas moléculas polares de muy pequeño tamaño, como el agua, el CO_2 , el etanol y la glicerina, también atraviesan la membrana por difusión simple. La difusión del agua recibe el nombre de ósmosis.

Difusión simple a través de canales (2). Se realiza mediante las denominadas proteínas de canal. Así entran iones como el Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Cl^- . Las proteínas de canal son proteínas con un orificio o canal interno, cuya apertura está regulada, por ejemplo por ligando (cofactores), como ocurre con neurotransmisores u hormonas, que se unen a una determinada región, el receptor de la

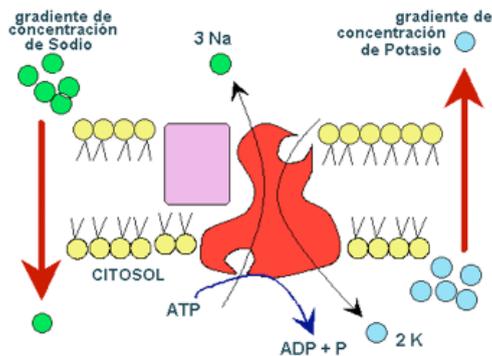
proteína de canal, que sufre una transformación estructural que induce la apertura del canal.



Difusión facilitada (3). Permite el transporte de pequeñas moléculas polares, como los aminoácidos, monosacáridos, etc, que al no poder, que al no poder atravesar la bicapa lipídica, requieren que proteínas transmembranas faciliten su paso. Estas proteínas reciben el nombre de proteínas transportadoras o permeasas que, al unirse a la molécula a transportar sufren un cambio en su estructura que arrastra a dicha molécula hacia el interior de la célula.

El transporte activo (4). En este proceso también actúan proteínas de membrana, pero éstas requieren energía, en forma de ATP, para transportar las moléculas al otro lado de la membrana. Se produce cuando el transporte se realiza en contra del gradiente electroquímico. Son ejemplos de transporte activo la bomba de Na/K, y la bomba de Ca.

La bomba de Na⁺/K⁺ Requiere una proteína transmembrana que bombea Na⁺ hacia el exterior de la membrana y K⁺ hacia el interior. Esta proteína actúa contra el gradiente gracias a su actividad como ATP-asa, ya que rompe el ATP para obtener la energía necesaria para el transporte.



Por este mecanismo, se bombea 3 Na⁺ hacia el exterior y 2 K⁺ hacia el interior, con la hidrólisis acoplada de ATP. El transporte activo de Na⁺ y K⁺ tiene una gran importancia fisiológica. De hecho todas las células animales gastan más del 30% del ATP que producen (y las células nerviosas más del 70%) para bombear estos iones.

PAPEL FISIOLÓGICO DE LOS ELEMENTOS ESENCIALES.

NITRÓGENO

Tal vez la función más reconocida del nitrógeno en la planta es su presencia obligada en los aminoácidos y por ende en la estructura de las moléculas de proteínas en donde se le encuentra en una cantidad que va del 16 al 18%. El nitrógeno también es encontrado en moléculas orgánicas muy importantes como las purinas, pirimidinas, porfirinas y en las coenzimas. Las purinas y pirimidinas son encontradas en los ácidos nucleicos DNA y RNA, esenciales para la síntesis de proteínas.

La estructura porfirínica es encontrada en compuestos metabólicamente muy importantes como son los pigmentos clorofílicos y los citocromos moléculas esenciales en la fotosíntesis y la respiración. Las coenzimas son compuestos indispensables para el funcionamiento de muchas enzimas. Otro tipo de compuestos que incluyen nitrógeno en su estructura molecular son las vitaminas.

El nitrógeno es el elemento más importante y abundante en la tierra. La gran reserva de nitrógeno esta en la atmósfera, que contiene casi un 78% de N₂. Esta forma es muy poco reactiva y no resulta apta para ser metabolizada directamente por las plantas, ni por la mayoría de los seres vivos. La mayor parte del nitrógeno atmosférico es fijado en el suelo por los microorganismos fijadores de nitrógeno. Existen otros microorganismos especializados que se encargan de mineralizarlo hacia amonio y oxidarlo luego a nitrato.

Generalmente el nitrógeno es absorbido por las plantas como iones nitrato (NO₃⁻) o como iones amonio (NH₄⁺), aunque el nitrato es rápidamente reducido, probablemente a amonio por medio de una enzima que contiene molibdeno.

La mayor parte del amonio tiene que ser incorporado a compuestos orgánicos en la raíz, mientras que el nitrato tiene una buena movilidad a través del xilema y puede ser almacenado en las vacuolas de células de la raíz, tallos y en órganos de almacenamiento. La acumulación de nitratos en las vacuolas es de considerable importancia para el balance cationes-aniones y para el proceso de osmorregulación.

En algunos cultivos comerciales se aplica una solución de urea a las hojas de las plantas como una manera de suministrar un suplemento de nitrógeno a las plantas. La urea no es absorbida por las raíces de las plantas en grandes cantidades, ya que se hidroliza y se transforma en nitrógeno amoniacal en la mayoría de los suelos. Los iones amonio y parte de los carbohidratos

sintetizados en las hojas son convertidos a aminoácidos en las mismas hojas verdes; por esta razón tan pronto como el nitrógeno asciende, las proteínas producidas en exceso permiten a las hojas de la planta alcanzar un mayor tamaño y con ello una mayor superficie para el proceso fotosintético.

Las proteínas en las células vegetales pueden ser funcionales o estructurales, siendo las primeras las que se encuentran en una mayor proporción. Las proteínas funcionales no son formas estables, por lo que constantemente están rompiéndose y reformándose.

Asimilación del nitrato.

La reducción de nitrato a amonio es llevada a cabo por dos enzimas: la nitrato reductasa, la cual reduce el nitrato a nitrito; y la nitrito reductasa, la cual reduce el nitrito a amonio.

La nitrato reductasa es un complejo enzimático con un peso molecular de 200,000 en plantas superiores y de 500,000 en plantas inferiores. Este complejo enzimático contiene varios grupos prostéticos incluyendo FAD, citocromos y molibdeno. Se localiza en el citoplasma y requiere de NADH o NADPH como donadores de electrones.

Como sería de esperarse, la actividad de la nitrato reductasa es muy baja en plantas que crecen en suelos deficientes en molibdeno.

La enzima nitrito reductasa tiene un bajo peso molecular y en las hojas se encuentra asociada a los cloroplastos y en las células de la raíz se asocia con proplastidios. En las hojas verdes el donador de electrones (NADH o NADPH) reduce a la ferredoxina, la cual es generada en la luz por el fotosistema I y en la obscuridad vía respiración.

Síntomas de deficiencia de nitrógeno

Las plantas con deficiencias de nitrógeno generalmente presentan un desarrollo raquítico que produce plantas anormalmente pequeñas, con tallos y ramas delgadas, hojas pequeñas. La floración se adelanta significativamente siendo esta muy escasa y con un gran porcentaje de flores abortadas. Cuando los amarran, su desarrollo se ve muy limitado por lo que los frutos son pequeños. Los síntomas anteriores son como respuesta de la planta a una reducida síntesis de proteínas tanto estructurales como funcionales.



Quizás el primer síntoma que muestra una planta que le falta nitrógeno sea la aparición de una clorosis (amarillamiento) de las hojas inferiores que cuando se secan adquieren un color pardo claro como en la figura anterior en plantas de tabaco. En cereales las hojas empiezan a secarse por los ápices y continúa a toda la hoja por la nervadura central.

Debido a la alta movilidad y a la alta solubilidad que tiene el nitrógeno, los síntomas aparecen primero en las hojas viejas, sin embargo, si la deficiencia continúa, el aspecto colrótico avanza hacia arriba de la planta y llega un momento en que toda la planta presenta los síntomas descritos.

FOSFORO

El fósforo forma parte de muchos compuestos importantes en las plantas como son las nucleoproteínas que están involucradas en la transferencia de la herencia genética en los cromosomas. También forma parte de los fosfolípidos y un tipo de ellos, la lecitina, se cree que esta presente en todas las células formando parte de las membranas celulares. Forma parte de muchos aceptores-donadores de hidrógeno como el nucleótido de difosfopiridina (DPN) o el nucleótido de trifosfopiridina (TPN) que están involucrados en la transferencia de H⁺ que ocurre en algunos pasos del ciclo de Krebs, la glicólisis y en el ciclo de la pentosa fosfato.

El fósforo forma parte también de los compuestos altamente energéticos adenosín difosfato (ADP) y adenosín trifosfato (ATP). De hecho, en la mayoría de las reacciones celulares donde ocurre una transferencia energética, están involucrados estos dos compuestos y una considerable proporción de la energía liberada por la respiración se almacena en las células como enlaces fosfato ricos en energía. Los enlaces fosfato proporcionan la energía para la síntesis de compuestos como sacarosa, almidón y proteínas.

El fósforo también está involucrado en el proceso fotosintético al participar en la fosforilación de varios intermediarios de la asimilación del CO₂. En las reacciones de los dos fotosistemas, el fósforo está involucrado en la conversión de la luz hacia energía química al reducir al NADPH y al ATP.

Síntomas de deficiencia de fósforo

En la mayoría de las plantas, una deficiencia de fósforo induce la formación de antocianinas con las cuales las hojas adquieren un color rojizo o purpúreo. Este síntoma aparece en las hojas jóvenes debido a la baja solubilidad y lenta movilización del fósforo. En maíz, el desarrollo del color purpúreo ocurre en los márgenes de las hojas y en las partes bajas del tallo. En tomate, el color se desarrolla principalmente en las nervaduras del enveze de las hojas. Algunas plantas desarrollan hojas de un color verde oscuro y en ocasiones un verde azulado.



La aparición de un color púrpura en la planta no solamente puede ser causado por una deficiencia de fósforo, también en ocasiones puede ser causado por una deficiencia de magnesio en algodón o de boro en clavel, aunque en el primer caso, el síntoma se presenta en las hojas viejas y en el caso de la deficiencia de boro, el síntoma se acompaña del daño característico a la yema terminal.

En cereales, se presenta un sistema radicular raquítico y aún más raquíticos los tallos y las hojas; estas adquieren un tono verde-grisáceo y un color rojizo en la base del tallo como en el maíz, el ahijamiento se disminuye y también el número de tallos fructíferos.

POTASIO

El potasio difiere de los elementos anteriores en que no forma parte estructural de la planta, su función más bien es activando enzimas que actúan en el metabolismo de la planta. Se han detectado más de 50 enzimas que dependen o son estimuladas por este elemento. Es el catión más abundante en el citoplasma y es el elemento que en mayor medida contribuye al mantenimiento del potencial osmótico celular.

El potasio parece ser importante en la síntesis de los aminoácidos y proteínas a partir de los iones amonio, ya que los tejidos que crecen en soluciones de alto contenido de amonio y bajo potasio, pueden morir por la elevada concentración de iones amonio que acumulan en estas condiciones.

Recientemente se ha demostrado que el potasio está involucrado en la síntesis del almidón, particularmente activando la enzima sintetasa del almidón. También se sabe que participa en la glicólisis, la fosforilación oxidativa, la fotofosforilación y para la síntesis de la adenina.

Al parecer el potasio también está involucrado en la translocación de los fotosintatos desde las hojas hacia otras partes de la planta en caña de azúcar.

Otra de las funciones que son atribuidas al potasio es la de mantener la turgencia celular regulando el potencial hídrico de las células y también participar en el mecanismo de apertura de los estomas durante la transpiración.

Síntomas de deficiencia de potasio.

La característica más generalizada entre las plantas de una deficiencia de potasio, es la presencia de áreas de tejido muerto en el ápice y bordes de las hojas viejas. Las hojas maduras primero muestran áreas cloróticas en los ápices y bordes que luego cambian a un color café con una apariencia ligeramente quemada para finalmente transformarse en tejidos muertos. Las quemaduras del ápice y márgenes también se presentan en monocotiledóneas, como el maíz, donde el ápice y márgenes son afectados primero.



El síntoma de deficiencia de potasio es fácilmente distinguible del síntoma provocado por falta de nitrógeno, en el cual el amarillamiento se inicia en la porción media de las hojas. La deficiencia de potasio también se ha asociado con una acumulación significativa de molibdeno en la hoja. Plantas con deficiencias de potasio acumulan hasta cuatro veces la concentración de molibdeno encontrada en plantas normales.

CALCIO

El calcio es un elemento imprescindible para la división celular en las zonas meristemáticas, particularmente en el crecimiento y desarrollo de los ápices de las raíces. Está presente en las células como pectato de calcio, el cual es un constituyente de la lámina media de la pared celular.

El calcio ha sido involucrado en la activación de algunas enzimas como la α -amilasa en el proceso de la germinación. Aunque el calcio estimula la enzima α -amilasa, no toma parte en la acción catalítica de esta enzima.

También se ha demostrado que es un activador de fosfatasa en tubérculos de papa, las cuales catalizan la dismutación de ADP's para producir ATP y ácido adenílico.

Se le ha dado al calcio, al igual que al potasio, una función químico-coloidal por estar involucrado en el mantenimiento de la turgencia celular.

Síntomas de deficiencia del Calcio.

El calcio es relativamente inmóvil y poco soluble y usualmente el elemento no se mueve de las hojas viejas a las hojas jóvenes.

Debido a esta inmovilidad, los síntomas de deficiencia se muestran en las partes terminales de la planta, ya sea en las yemas terminales del ápice, en las hojas jóvenes y en los ápices de las raíces.



Los síntomas de deficiencia de calcio pueden ser observados inicialmente en las raíces antes de que aparezcan los primeros síntomas en las partes aéreas. Los ápices de las raíces se cubren de una sustancia viscosa o mucilaginosa y se tornan a un color negro. Las plantas empiezan a formar nuevas raíces cerca de la base del tallo.

En los ápices aéreos, la deficiencia de calcio afecta tanto la yema terminal, la cual termina por morir, como las yemas axilares. Las hojas jóvenes cercanas al ápice se encorvan al principio y mueren finalmente por el ápice y los bordes.

MAGNESIO

El magnesio es necesario en todas las plantas verdes, dado que es el componente central de la molécula de clorofila. Cada molécula de clorofila contiene un átomo de magnesio el cual significa el 2.7% del peso molecular de la clorofila. Del total de magnesio en la planta, menos del 0.1% esta presente en la clorofila; la mayoría de este catión se encuentra unido con ácidos orgánicos y con aniones inorgánicos.

Desempeña también un papel importante en la translocación del fósforo en la planta y posiblemente a consecuencia de esto, se acumula en las semillas de las especies ricas en aceites, pues el aceite va acompañado de una acumulación de lecitina, un lípido que contiene fosfato.

El magnesio es un activador de una gran cantidad de enzimas como son: enolasas, hexoquinasas, pirofosfatasa, carboxilasas, fosfoquinasas, glutamino-sintetasa, succinil-CoA sintetasa, etc.,. También es requerido para la descarboxilación oxidativa del ácido pirúvico para formar acetil-CoA.

El magnesio actúa como un elemento de unión para la agregación de las subunidades de los ribosomas, proceso que es necesario para la síntesis de proteínas. Cuando el nivel de magnesio es deficiente, las subunidades ribosomales se disocian y se detiene la síntesis de proteínas. También es requerido por la RNA-polimerasa e incrementa la formación de RNA en el núcleo.

Síntomas de deficiencia del magnesio.

En contraste con el calcio, el magnesio es muy móvil y puede trasladarse de las hojas viejas a las hojas jóvenes en un estado de deficiencia. Por esta razón, cuando existe poco magnesio, las hojas viejas presentan un amarillamiento o clorosis intervenal que puede transformarse en áreas de tejido muerto entre las nervaduras si la deficiencia es muy drástica o suficientemente aguda. En algunas plantas los bordes de las hojas viejas se encorvan con la concavidad hacia arriba.



AZUFRE

Aunque el SO₂ atmosférico es tomado y utilizado por las partes aéreas de las plantas, la fuente más importante de azufre son los sulfatos que entran a la planta a través de la raíz. El anión divalente (SO₄⁼) es tomado por las raíces a velocidades relativamente bajas y para el transporte a larga distancia es enviado principalmente al xilema.

El azufre es un constituyente de los aminoácidos cistina, cisteína y metionina. Estos aminoácidos son precursores de otros compuestos que contienen azufre como son las coenzimas, y algunos productos del metabolismo secundario. El azufre forma parte del ácido lipoico, la tiamina pirofosfato y la biotina. Está presente también en los lípidos producidos por ciertas plantas como el aceite de mostaza de las especies de *Brassica*.

La asimilación del azufre es semejante en varios aspectos al nitrógeno. Por ejemplo, es necesaria una reducción para que el azufre sea incorporado a los aminoácidos, proteínas y coenzimas, en las hojas verdes la ferredoxina es el agente reductor para el sulfato.

A diferencia del nitrógeno, el azufre reducido puede ser oxidado otra vez en las plantas superiores, este proceso es más evidente cuando ocurre la rápida degradación de las proteínas durante la senescencia de las hojas. Durante esta oxidación, el azufre reducido de la cisteína es convertido a sulfato, que es la forma más segura de almacenar el azufre en las plantas.

Síntomas de deficiencia del azufre.

Las plantas que tienen una deficiencia de azufre, presentan una clorosis muy característica en las hojas jóvenes pues las nervaduras de estas hojas se vuelven de un color claro, casi blanco, contrastando con el color amarillento del resto de la hoja. Los tallos son cortos y endebles y muestran un color amarillo. El crecimiento en general de la planta se muestra lento y raquítico.



FIERRO

La función del hierro en el metabolismo de la planta, básicamente se debe a la característica facilidad de este elemento para reducirse (Fe^{3+}) y oxidarse (Fe^{2+}). Debido a esta propiedad, el hierro forma parte importante de dos grupos bien definidos de proteínas que contienen hierro: las hemoproteínas y las proteínas hierro-azufre.

Las hemoproteínas mejor conocidas son los citocromos, las cuales contienen un complejo heme hierro-porfirínico como un grupo prostético. Los citocromos son constituyentes de los sistemas redox en los cloroplastos y en las mitocondrias; y como enzima citocromo-oxidasa, participa en el paso terminal de la cadena respiratoria.

Otras enzimas heme son la catalasa y las peroxidasas. La catalasa facilita la dismutación del peróxido de hidrógeno hacia agua y oxígeno de acuerdo a la ecuación:



Las peroxidasas son abundantes en las paredes celulares de la rizodermis y la endodermis en la raíz y existe suficiente evidencia de que las peroxidasas presentes en la rizodermis, juegan un papel muy importante en la regulación de la absorción del hierro.

De las proteínas hierro-azufre, la más importante es la ferredoxina, la cual actúa como un agente de transferencia de electrones en varios procesos metabólicos básicos (NADP⁺, en fotosíntesis; nitrato reductasa; sulfato reductasa; reducción del N_2).

El hierro también está contenido en otras enzimas como es la xantina oxidasa, que actúa en el metabolismo de la purina; la aconitasa, que cataliza la isomerización del citrato al isocitrato en el ciclo de Krebs. En la biosíntesis de la clorofila también está involucrado el hierro ya que controla la síntesis del ácido *d*-aminolevulínico el cual es el precursor de la molécula de clorofila. La incorporación de hierro o magnesio como el átomo central del tetrapirrol permite la formación de coenzimas heme o de Mg-protoporfirina respectivamente.

Síntomas de deficiencia de hierro.

Los síntomas de deficiencia del hierro se presentan como una clorosis típica, particularmente sobre suelos calizos; no obstante, no todos los suelos calizos inducen este tipo de clorosis.



Por ser el hierro un elemento pesado y poco soluble, los principales síntomas de deficiencia se presentan en las hojas jóvenes y consisten en una clorosis de la hoja con las nervaduras principales y secundarias de color verde. La deficiencia de hierro también está asociada con una inhibición de la elongación celular, un incremento en el diámetro de la zona apical de la raíz y una abundante formación de pelos radicales. A nivel ultramicroscópico, la deficiencia de hierro se manifiesta en una inhibición del desarrollo del cloroplasto.

Manganeso

La función del manganeso más ampliamente estudiada en las plantas superiores es su papel en la evolución del oxígeno fotosintético. En las reacciones del fotosistema II, la molécula de agua es descompuesta por una deshidrogenasa que es activada por un ion manganeso. Como producto de esta reacción, un O_2 es liberado y los dos átomos de hidrógeno son enviados a la plastoquinona para iniciar el transporte de electrones de fotosíntesis.

Al igual que el hierro y otros metales de grupo de los pesados, el manganeso tiene funciones de activación de numerosas enzimas relacionadas con el metabolismo de los carbohidratos, reacciones de fosforilación y ciclo del ácido tricarbónico, y conjuntamente con otros metales en la activación de enzimas tales como arginasa, cisteína de sulfhidrasa, desóxido de nucleasa, fosfatasa y glutamil transferasa. El manganeso es requerido solo en pequeñas cantidades y cuando se aplica en grandes cantidades es fuertemente tóxico.

Síntomas de deficiencia de Manganeso.

El manganeso, al igual que el hierro y otros metales, es relativamente inmóvil por lo que los síntomas de su deficiencia se muestran primero en las hojas jóvenes. Estas hojas presentan una clorosis caracterizada por la aparición de manchas amarillentas y necróticas entre las nervaduras. Aparecen zonas grisáceas cerca de la base de las hojas más tiernas y se vuelven de amarillentas a amarillo naranja.



También provoca lo que se conoce como manchas resinosas de los cítricos, el lunar gris en la avena, la mancha del pantano en el chícharo y la enfermedad de las rayas en caña de azúcar. A nivel celular, ocurre una disminución en el número de cloroplastos o bien una desorganización de los mismos con una baja concentración de clorofila.

COBRE

El cobre es absorbido en forma de ion cúprico (Cu^{2+}) y puede ser absorbido como una sal de un complejo orgánico como el EDTA. El cobre divalente es rápidamente reducido a Cu^+ , el cual es inestable. En este aspecto el cobre es similar al hierro. La mayoría de las funciones del cobre en la planta están basadas en su potencial para actuar en las reacciones redox.

El cobre está presente en tres diferentes formas en las proteínas: *proteínas azules* que no tienen actividad oxidativa y cuya función es de transferencia de un electrón (plastocianina); *proteínas no-azules* las cuales producen peroxidasas y oxidan monofenoles a difenoles; y *proteínas multicobre* que contienen al menos cuatro átomos de cobre por molécula y las cuales actúan como oxidasas (oxidasa del ácido ascórbico).

Más del 50% del cobre que se localiza en los cloroplastos está unido a la plastocianina, compuesto que es un componente del transporte de electrones del fotosistema II. Está presente en la citocromo oxidasa y estimula la formación de la vitamina A en las plantas.

Síntomas de deficiencia del Cobre.

En cereales, la deficiencia de cobre provoca una clorosis o amarillamiento y rizado de la lámina foliar, una limitada producción de espigas y un desarrollo deficiente del grano, además de un amacollamiento indeterminado. En cítricos, ocurre un marchitamiento de los brotes nuevos y el fruto muestra excrescencias de color castaño.



La muerte gradual de los ápices de las plantas seguido por un crecimiento en roseta, ha sido asociada con una deficiencia de cobre. En plantas de maíz deficientes en cobre, las hojas muestran un color verde pálido a amarillo y el ápice de las hojas se torna necrótico y muere. En un nivel bajo de deficiencia de cobre, las hojas jóvenes se secan en el margen cerca de la base de la hoja.

ZINC

El zinc es absorbido como un catión divalente (Zn^{2+}); en un pH alto, probablemente es absorbido como un catión monovalente (ZnOH^+). Una alta concentración de otros iones divalentes como Ca^{2+} inhiben la absorción del zinc. El zinc actúa tanto como un componente metal de enzimas, como un cofactor funcional, estructural o regulatorio de un gran número de enzimas.

Como componente de enzimas, el zinc está contenido en al menos cuatro de ellas: alcohol deshidrogenasa, superóxido Cu-Zn dismutasa, anhidrasa carbónica y la RNA-polimerasa. Como cofactor funcional, el zinc activa enzimas como: aldolasas, deshidrogenasas, isomerasas, transfosforilasas y RNA y DNA-polimerasas. También el zinc ha sido asociado con la síntesis de proteínas en la planta ya que al presentarse una deficiencia de zinc, la síntesis de proteínas se reduce y se presenta una gran acumulación de aminoácidos y amidas.

Quizás el papel más distintivo del zinc en la planta sea su intervención en el metabolismo de las auxinas. El zinc es requerido para la síntesis del triptófano, el cual es el precursor del ácido indolacético.

Síntomas de deficiencia de Zinc.

El síntoma más característico de una deficiencia de zinc es la reducción del tamaño de la planta en general, provocado por una reducción de los entrenudos. En la mayoría de las plantas, una falta de zinc provoca un tipo de crecimiento en roseta.



En maíz, aparece una banda amarilla clara en el centro de la hoja a través de la nervadura central, además de la presencia de venas rojizo-púrpúreas entre la vena central y el borde de la hoja, principalmente en su mitad inferior.

En los cítricos y en tomate (figura anterior) se presenta una clorosis intervenal irregular; las hojas terminales se achican y estrechan; la formación de yemas frutales se reduce en gran medida; las ramas jóvenes se mueren. En durazno, las hojas jóvenes se arrugan y los bordes se ondulan además de presentarse una clorosis intervenal.

BORO

El boro es absorbido en una o varias de sus formas iónicas, como $B_4O_7^{2-}$, $H_2BO_3^-$, HBO_3^{2-} , o BO_3^{3-} . Se requiere en pequeñas cantidades y algunas plantas son muy sensibles a este elemento por lo que cantidades normales para algún cultivo, resultan tóxicas para otros. Participa en el metabolismo de los carbohidratos y facilita el transporte de azúcares formando un complejo permeable boro-azúcar aumentando la permeabilidad de la membrana celular.

Otra función atribuida a este elemento es la inhibición de la formación del almidón por medio de una combinación con la parte activa de la fosforilasa, de esta manera, el boro tiene una función protectora al prevenir la excesiva polimerización de los azúcares en las situaciones de síntesis del azúcar. El boro es requerido tanto para la división como para la elongación celular y participa en la biosíntesis de la lignina por lo que se considera también juega un papel importante en la diferenciación del xilema.

Síntomas de deficiencia de Boro.

El boro es similar al calcio en cuanto a su movilidad y permanece inmóvil en la mayoría de las especies. La sensibilidad a la deficiencia de este elemento varía considerablemente entre las plantas siendo las dicotiledóneas mucho más sensitivas que las monocotiledóneas.



El ápice de la raíz es la primera parte de la planta en exhibir los síntomas de la deficiencia de boro, los cuales muestran una raíz translúcida y a menudo rodeada de una capa mucilaginosa. Posteriormente a la raíz, son afectadas las yemas terminales de las partes aéreas, las yemas axilares y las yemas florales. Estas estructuras se vuelven amarillentas, luego necróticas y finalmente se desprenden de la planta. Las hojas jóvenes de la planta a menudo son de un color verde oscuro, esponjosas y malformadas (figura anterior). En tabaco, la base de las hojas jóvenes se vuelve necrótica. En tubérculos se presenta el "corazón pardo" caracterizado por manchas oscuras en las partes más gruesas del tubérculo o porque se parten del centro.

MOLIBDENO

El molibdeno es absorbido por las raíces de las plantas como un ion divalente MoO_4^{2-} . El requerimiento de molibdeno es el más bajo que para cualquiera de los demás nutrientes. Las funciones del molibdeno están relacionadas con el cambio de valencias como un componente de enzimas. En su estado oxidado existe como $Mo(VI)$ y es reducido a $Mo(V)$ y eventualmente a $Mo(IV)$.

Las enzimas que contienen molibdeno como un cofactor son: xantina oxidasa-deshidrogenasa, aldehído oxidasa, sulfito oxidasa, nitrato reductasa y nitrogenasa. En la enzima nitrato reductasa existen dos átomos de molibdeno y esta enzima cataliza la reducción de nitrato a nitrito por un cambio reversible de valencias. También la molécula de la enzima nitrogenasa contiene dos átomos de molibdeno por lo que el molibdeno está directamente involucrado en la reducción del nitrógeno.

Síntomas de deficiencia de Molibdeno.

La falta de molibdeno en el suelo provoca la aparición de manchas cloróticas intervenales en las hojas inferiores, seguido de una necrosis marginal y de un repliegue de las hojas. En general las plantas deficientes en molibdeno producen hojas deformes con los márgenes irregulares lo que hace que las hojas estén menos anchas y con una menor área foliar.



En la coliflor, los tejidos foliares se mustian dejando solamente la nervadura central y unos pocos fragmentos del limbo foliar ("punta de látigo").

ELEMENTOS NO ESENCIALES UTILIZADOS POR LA PLANTA.

Existen elementos minerales que pueden estimular el crecimiento de las plantas pero que no están comprendidos dentro de los criterios de esencialidad mencionados anteriormente. Algunos de ellos resultan esenciales solamente para algunas especies o bajo ciertas condiciones muy especiales. Estos elementos usualmente son definidos como elementos benéficos y aplica a elementos como: sodio, cloro, silicio, cobalto, vanadio, etc.

SODIO

Aunque el sodio es un elemento no esencial, son muchas las plantas que lo utilizan e inclusive, tienen un mejor desarrollo en presencia de sodio utilizable que en su ausencia. En casos como este, el sodio al parecer cumple alguna de las funciones que normalmente realiza el potasio. Las especies se pueden dividir en cuatro grupos de acuerdo a sus necesidades relativas de sodio en comparación con las de potasio: a) plantas que necesitan sodio para su desarrollo óptimo, b) plantas que se benefician si existe sodio utilizable, c) plantas que toleran la substitución en parte de sodio por potasio y d) plantas que no utilizan el sodio aún cuando exista deficiencia de potasio.

El mecanismo por medio del cual el sodio funciona como un micronutriente en especies C4 como *Atriplex vesicaria*, *Amaranthus tricolor* o *Kochia childsii* no esta muy claro ya que ni las enzimas ni el mecanismo completo de la vía C4 se ven afectadas por el sodio.

CLORO

El cloro es absorbido como un anión monovalente (Cl-) y debido a que es aportado para la planta desde muchas fuentes (lluvia, reservas del suelo, fertilizantes, y contaminación del aire), es más común encontrar situaciones donde el cloro resulta tóxico, que encontrar deficiencias del mismo.

Usualmente el bromo se encuentra, en forma natural, en concentraciones mucho menores que el cloro (el cloro es 1000 veces más abundante que el bromo), pero en forma experimental cuando se aplica en una mayor concentración, puede sustituir al cloro de una manera similar a la que el sodio sustituye al potasio. La reducción del crecimiento y los síntomas de deficiencia ocasionados por una deficiencia de cloro puede ser restaurada hasta en un 90% por una adecuada fertilización con bromo.

Entre los cultivos que responden a la presencia de este elemento están: tabaco, tomate, lechuga, chícharo, coles, zanahoria, remolacha azucarera, avena, maíz, papa y algodón.

SILICIO

El silicio es el segundo elemento más abundante en la corteza de la tierra. La forma en que se encuentra diluido en el suelo es como ácido monosilícico, Si(OH)₄.

Las plantas superiores difieren en forma característica en su capacidad para absorber el silicio, dependiendo de su contenido de SiO₂, ellas pueden ser divididas en tres grupos: gramíneas de tierras húmedas, como son el arroz o las "colas de caballo" (*Equisetum*) con un 10-15%; gramíneas de tierras secas, como la caña de azúcar y la mayoría de los cereales y unas pocas dicotiledóneas, con un 1-3%; y la mayoría de las dicotiledóneas, especialmente las leguminosas, con < 0.5%. En plantas superiores se ha establecido la esencialidad de este elemento para las especies acumuladoras de sílice (especies silicófilas) como *Equisetum arvense* y ciertas especies de pastos de tierras húmedas.

En ausencia de silicio, se ha observado una considerable disminución en la incorporación de fosfato inorgánico para el ATP,ADP y azúcares fosfatados en caña de azúcar; en las paredes celulares de las raíces de trigo la lignina disminuye, mientras que algunos compuestos fenólicos aumentan.

Bajo condiciones de campo, particularmente en siembras de alta densidad en cereales, el silicio puede estimular el crecimiento y rendimiento indirectamente disminuyendo la competencia por la luz provocando hojas erectas, disminuyendo también la incidencia de enfermedades fungosas y previniendo la toxicidad del hierro y/o manganeso. Los depósitos de silicio en la capa epidérmica de las hojas es particularmente efectivo para incrementar la resistencia mecánica del tejido a la infección de los mildews y al ataque de los insectos.

COBALTO

El requerimiento de cobalto para la fijación del nitrógeno en las leguminosas y no leguminosas fue establecido desde hace casi 40 años por Ahmed y Evans. Se conoce que *Rhizobium* y otros microorganismos fijadores de nitrógeno tienen un absoluto requerimiento de cobalto.

El cobalto es el metal componente de la coenzima cobalamina (vitamina B12 y sus derivados), la cual está quelatada a cuatro átomos de nitrógeno en el centro de una estructura porfirínica, similar a la del hierro en la hemina. Se han identificado tres sistemas enzimáticos dependientes de cobalamina en *Rhizobium* en los cuales el cobalto induce cambios en sus actividades enzimáticas y son responsables de la relación entre el cobalto, la nodulación y fijación de nitrógeno en las leguminosas: a) metionina sintetasa. Bajo condiciones de deficiencia de cobalto, se presenta una irregular síntesis de proteínas. b) ribonucleótido sintetasa. Esta enzima está involucrada en la reducción de ribonucleótidos a desoxirribonucleótidos y de esta manera, en la síntesis del DNA. c) metilmalonil-coenzima A mutasa. Esta enzima está involucrada en la síntesis de porfirinas de hierro y en la síntesis de la hemoglobina. Bajo condiciones de deficiencia de cobalto, la síntesis de legemoglobina se reduce, lo cual afecta de mayor manera la fijación de nitrógeno.

NIQUEL

El níquel es rápidamente absorbido por la mayoría de las especies cultivadas. Como un catión divalente (Ni²⁺) compete con otros cationes, incluyendo Ca²⁺, Mg²⁺, Fe²⁺ y Zn²⁺, sin embargo, altos niveles de níquel en el suelo y en las plantas pueden inducir deficiencias de zinc o hierro y se manifiestan los síntomas característicos de clorosis. Existe evidencia que demuestra que el níquel es el metal de que está compuesta la ureasa, la enzima que cataliza la reacción:



El níquel no es requerido para la síntesis de la enzima, pero es el componente metal y por lo tanto es esencial para la estructura y funcionamiento de la enzima. El níquel podría ser considerado como esencial para ciertos tipos de nutrición nitrogenada y para algunas familias de plantas.

SELENIO

El selenio es absorbido por las plantas como selenato (SeO₄²⁻) o como selenita (SeO₃²⁻). El selenato y el sulfato (SO₄²⁻) compiten por los mismos sitios de unión en la membrana celular de las células de la raíz. La absorción y el transporte así como la asimilación del selenato sigue la misma vía que el sulfato y en ocasiones se forman compuestos análogos de selenio de cisteína y metionina llamados selenocisteína y selenometionina.

La ruta de asimilación del selenio es la misma para plantas acumuladoras y no acumuladoras de selenio, y los selenoaminoácidos son incorporados en proteínas las cuales son no funcionales o son mucho menos capaces de funcionar como enzimas comparadas con las correspondientes proteínas que contienen azufre.

ALUMINIO

Muchas plantas cultivadas son sensibles a altas concentraciones de aluminio y la toxicidad del aluminio en suelos ácidos es un serio problema que ha requerido investigación de fitomejoramiento para lograr plantas con tolerancia a concentraciones altas de

aluminio.

Existen reportes de investigación que muestran que a bajas concentraciones de este elemento en el suelo o en las soluciones nutritivas puede estimular el crecimiento. Estas concentraciones varían de 0.2 a 0.5 mg/litro en remolacha azucarera, maíz y algunas leguminosas tropicales. En plantas de te, la cual es una de las especies cultivadas más tolerantes al aluminio, la estimulación del crecimiento fue observada a concentraciones tan altas como 27 mg/litro.

También se ha reportado que el aluminio puede servir como un fungicida en ciertos casos de enraizamiento de raíces. Los efectos del aluminio mencionados pueden ser la excepción, ya que lo normal es que el aluminio cause efectos negativos en el crecimiento de las plantas que crecen en suelos de bajo pH.

Factores que afectan la absorción de iones minerales.

Existen factores internos y externos de la planta que afectan la absorción de los iones minerales.

Factores internos

El factor puramente genético de la especie determina la capacidad de absorción de los distintos iones. Existen algunas especies de plantas que pueden absorber sales y acumularlas en un grado mucho mayor que otras sin que se produzcan efectos tóxicos.

La etapa fenológica de la planta es otro factor interno que determina la absorción de iones. Las plantas absorben la mayor cantidad de nutrientes durante la etapa vegetativa, ya que en el momento de la floración se detiene relativamente la absorción pues la planta está gastando grandes cantidades de energía en dicho proceso de desarrollo. El estado general de sanidad de la planta también influye directamente. Se ha demostrado que una planta enferma posee menos capacidad de absorción de nutrientes.

Factores externos

El PH del suelo

La cantidad o concentración de iones de hidrógeno que tiene la solución del suelo determina la acidez o alcalinidad del mismo. Cuando la concentración de iones de hidrógeno que posee la solución es alta se dice que es ácida, cuando la concentración de H⁺ es baja se dice que es básica o alcalina.

Para medir esta característica de la solución del suelo se usó el pH, un suelo es neutro cuando el pH es igual a 7, ácido cuando el pH es inferior a 7 y básico cuando es superior a dicho nivel. En el suelo raramente se llega a un pH inferior a 4 (muy ácido) o al pH 10 (demasiado alcalino). Los suelos agrícolas generalmente tienen un pH entre 6 y 7.5, rango en el que mejor se desarrolla las plantas.

El pH se refiere a la concentración de H⁺ del complejo absorbente (retenidos en los coloides), es decir que da una medición parcial y no total; los suelos pueden tener el mismo pH pero pueden variar en su contenido total H⁺ (l del complejo absorbente más el de la solución del suelo) en general en un suelo ácido a medida que aumenta su capacidad de cambio (capacidad de retener los cationes) es mayor su acidez total para un mismo pH de la solución, al disminuir el pH del suelo se frena al desarrollo de muchos microorganismos, disminuyendo las cantidades de elementos nutritivos, asimilables por las plantas y se incrementa de elementos tóxicos que las raíces absorben.

Para corregir la acidez total del suelo, es decir, para aumentar el pH de estos suelos ácidos se procede el "encalado" que es la adición de cal al suelo para sustituir los iones hidrógeno por los iones de calcio, tanto en la solución como en el complejo como un suelo arcilloso tiene, por las características de sus coloides, una mayor capacidad de cambio, necesita que se le añada más calcio que si fuera un suelo arenoso posee una capacidad de cambio menor.