

Compilación sobre nutrimentos, sustancias donde se les encuentra y síntomas que ocasionan cuando su concentración disminuye en las plantas

Leopoldo Partida¹, Tomás Díaz², Leidy Cortegaza³, Norma Delia Zazueta⁴, Luz Llarelly Cazarez Flores⁵

¹Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa. México. parpolo@yahoo.com.mx

²Universidad Central del Este. San Pedro de Macorís. República Dominicana. tdiaz@uce.edu.do

³Universidad Central del Este. San Pedro de Macorís. República Dominicana. lcortegaza@uce.edu.do

⁴Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa. México. norma_zazueta2812@hotmail.com

⁵Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa. México. llare_luz@hotmail.com

Recibido: 4 mayo 2022

Aceptado: 11 agosto 2022

RESUMEN

Esta investigación se realizó con el objetivo de reunir información en un solo documento acerca de la función directa o indirecta que juegan los nutrimentos en la composición o síntesis de sustancias, tejidos y órganos que forman las plantas, para lo cual se hizo revisión de varias obras y se reunió lo más posible de la información disponible acerca de las funciones de cada nutrimento en el metabolismo de sustancias componentes de las células que constituyen tejidos y órganos vegetales, así como los síntomas que ocasiona una deficiencia de los mismos. La compilación abarcó 14 nutrimentos de los más de 16 que son necesarios en la nutrición vegetal, mismos que forman parte de proteínas activas (enzimas) necesarias para formar sustancias, mientras que otros son parte importante de coenzimas necesarias para la síntesis de sustancias, o bien forman parte de paredes celulares y tejidos vegetales, que cuando no forman parte de éstos, permanecen en forma iónica y pueden ser lavados con facilidad del follaje. De tal manera que los síntomas de deficiencia pueden deberse a la falta directa del nutrimento en las enzimas necesarias para formar moléculas o por falta del nutrimento en la formación de coenzimas necesarias para activar a las enzimas que se requieren para sintetizar sustancias que conllevan a la multiplicación y elongación celular y, en consecuencia, al crecimiento, desarrollo y senescencia de las plantas.

PALABRAS CLAVE: Nutrición de plantas; Síntesis de sustancias; Sustancias; Tipos de nutrimentos

ABSTRACT

Compilation on nutriments, substances where they are found and symptoms caused when their concentration decreases in plants. This research was carried out with the objective of gathering information in a single document about the direct or indirect role that nutrients play in the composition or synthesis of substances, tissues and organs that make up plants, for which several works were reviewed. and as much as possible of the available information was gathered about the functions of each nutrient in the metabolism of component substances of the cells that constitute the plant tissues and organs, as well as the symptoms caused by their deficiency. The compilation covered 14 nutrients of the more than 16 that are necessary in plant nutrition, which are part of active proteins (enzymes) necessary to form substances, while others are an important part of coenzymes necessary for the synthesis of substances, or They are part of cell walls and plant tissues, which when they are not part of these, remain in ionic form and can be easily washed from the foliage. In such a way that the deficiency symptoms may be due to the direct lack of nutrients in the enzymes necessary to form the molecules or due to the lack of nutrients in the formation of coenzymes necessary to activate the enzymes that are required to synthesize substances that lead to the cell multiplication and elongation and, consequently, to the growth, development and senescence of plants.

KEYWORDS: Plant nutrition; Synthesis of substances; Substances; Types of nutrients

INTRODUCCION

Al conjunto de transformaciones materiales que se realiza constantemente en las células del organismo vivo, y que se manifiesta mediante una fase de carácter constructor (anabólica) y a través de otro de tipo destructor (catabólica); es decir, los cambios químicos que ocurren cuando las plantas llevan a cabo la fotosíntesis se conocen como metabolismo. En la célula se realizan simultáneamente procesos tanto sintéticos como de degradación, y la energía liberada de la descomposición de algunos compuestos puede utilizarse para la síntesis de otros componentes celulares (Conn *et al.*, 2002).

En la naturaleza existe una serie de elementos minerales que las plantas utilizan para elaborar las moléculas orgánicas que necesitan; algunos de éstos son: nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, manganeso, hierro, azufre, cobre, zinc, boro, níquel, molibdeno, sodio, cloro, silicio, etc. Dichos elementos o nutrimentos de los vegetales se clasifican en elementos traza, oligoelementos o micronutrientes y en macronutrientes, porque se necesitan en concentraciones de 100 y 1000 mg kg⁻¹ de materia seca, respectivamente. Lo anterior también ha conllevado a la consideración de los siguientes dos criterios principales para que un elemento pueda considerarse esencial o no esencial para cualquier vegetal:

- a) Un elemento es esencial si el vegetal no puede completar su ciclo; es decir, formar semillas viables, en ausencia de tal elemento.
- b) Un elemento es esencial si forma parte de cualquier molécula constituyente de la planta, por lo que en sí mismo es esencial para ésta, como el nitrógeno en las proteínas y el magnesio en la clorofila.

Sin embargo, muchas veces los elementos esenciales se han clasificado funcionalmente en dos grupos: los que participan en la estructura de un compuesto importante, y los que disponen de una función activadora de enzimas. Realmente, no hay ninguna distinción clara entre estas dos funciones, ya que varios elementos forman parte estructural de enzimas esenciales y también ayudan a catalizar la reacción química en la que participa la enzima. El C, O, H⁺ y Mg²⁺, son ejemplos de lo más claro respecto a qué elementos realizan ambas funciones, aunque el N y S, que también se encuentran en las enzimas, son casi igual de importantes. No obstante, la mayoría de los micronutrientes son esenciales, especialmente porque activan enzimas (Robb y Peirpont, 1983).

El objetivo de esta investigación fue reunir información en un solo documento acerca de la función directa o indirecta que juegan los nutrimentos en la composición o síntesis de sustancias, tejidos y órganos que forman las plantas.

METODOLOGÍA

La investigación bibliográfica incluyó revisión de varias obras impresas y revistas científicas de circulación internacional, y se reunió lo más posible de la información disponible acerca de las funciones de cada nutrimento en el metabolismo de sustancias componentes de las células que constituyen tejidos y órganos vegetales, así como los síntomas que ocasiona una deficiencia de los mismos. La compilación abarcó 14 nutrimentos de los más de 16 que son necesarios en la nutrición vegetal, mismos que forman parte de proteínas activas (enzimas) necesarias para formar sustancias, mientras que otros son parte importante de coenzimas necesarias para la síntesis de sustancias, o bien forman parte de paredes celulares y tejidos vegetales, que cuando no forman parte de éstos, permanecen en forma iónica y pueden ser lavados con facilidad del follaje.

Mediante la revisión documental se sustrajo información sobre su existencia en las partículas y solución del suelo, compuestos químicos que los contienen en las plantas, para que éstas puedan llevar a cabo procesos de vital importancia como lo es la fotosíntesis, respiración, oxidación, crecimiento, desarrollo y reproducción. Dicha información se organizó en secciones correspondientes a cada nutrimento, para que el lector pueda disponer del conocimiento acerca de las formas en que las plantas pueden absorberlos del suelo; asimismo, en qué sustancias se les encuentra en las células, tejidos y órganos.

RESULTADOS Y DISCUSION

NITRÓGENO

Desde el suelo se absorben dos formas iónicas básicas del nitrógeno: nitrato (NO₃⁻) y amonio (NH₄⁺), las cuales proveen a la planta del suficiente nitrógeno para formar clorofila. La clorosis general suele ser un síntoma de deficiencia de nitrógeno, principalmente en las hojas más viejas, ya que las más jóvenes pueden conservarse verdes durante más tiempo, debido a la movilidad del nitrógeno de las hojas viejas a las más jóvenes. En cambio, una sobreabundancia de nitrógeno hace que las hojas sean de color verde oscuro y las plantas forman mucho follaje, pero con un sistema radical muy pequeño, así que aplicar de 300 a 450 kg de N ha⁻¹ en cultivo de maíz evitará el exceso de nitrógeno e inducirá buen rendimiento de grano, puesto que con 600 kg de N ha⁻¹ la cantidad de productos útiles disminuye (Salisbury y Ross, 2000; Díaz *et al.*, 2014). En papas, el exceso de nitrógeno ocasiona crecimiento excesivo en la parte aérea y sus tubérculos son pequeños. En tomate, el exceso de nitrógeno conlleva a que los frutos se partan al madurar. Con el exceso de nitrógeno también la floración y la formación de semillas se retardan (Salisbury y Ross, 2000). En cultivos como el maíz, la deficiencia de nitrógeno se manifiesta a través de un

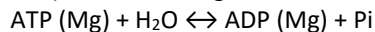
amarillamiento que inicia en la punta de las hojas más viejas y se extiende por la nervadura central hasta la vaina de la hoja o punto de unión con el tallo (Millar *et al.*, 1980). El nitrógeno también forma parte de moléculas como el ADN, ARN, adenina, guanina, citosina, timina, uracilo, aminoácidos, proteínas, enzimas, coenzimas, entre otras moléculas, todos ellos están implicados en fenómenos de elongación, división, multiplicación celular y, en consecuencia, en el crecimiento y desarrollo de las plantas (Strickberger, 1978; Freifelder, 1988; Lea and Leegood, 1993; Salisbury y Ross, 2000; Conn y Stumpf, 2002).

FÓSFORO

La absorción de fósforo ocurre principalmente como anión monovalente fosfato ($H_2PO_4^-$) y menos rápidamente como el anión divalente (HPO_4^{2-}). Gran parte del fosfato en la planta existe en forma orgánica, pero es probable que se transporte principalmente en estado inorgánico. El fosfato se retiene firmemente en el complejo mineral del suelo, en la misma forma que el potasio. El fósforo, como el nitrógeno, es muy importante como parte estructural de muchos compuestos orgánicos, principalmente ácidos nucleicos, fosfolípidos, trifosfatos de adenosin, difosfato de adenosin, monofosfato de adenosin, pirofosfato, galactosa-1-fosfato, uridin difosfato galactosa (UDP-galactosa), uridin trifosfato, ácido fosfoglicérico, fosfoenolpirúvico, glucosa-6-fosfato, difosfato de fructosa, gliceraldehido-3-fosfato, coenzima NADPH, ribulosa-bisfosfato (RuBP), ácido fosfoglicólico, uridin difosfato glucosa (UDPG). El fósforo forma parte del material genético (cromosomas y genes), por lo que está implicado en la división celular y la reproducción de las plantas (Plaster, 2000).

En unas células, la descomposición de los compuestos anteriormente referidos tiene la consecuencia de generar sustancias más sencillas, que luego pueden ser asimiladas por otras células, lo que ocasiona que las células dispongan de los elementos necesarios para elaborar aquéllos que requieren para su constitución, sobrevivencia o multiplicación, haciendo que las plantas manifiesten un crecimiento y desarrollo, hasta presentar la senescencia de órganos, como las hojas, o simplemente hasta que ellas mueren. Sin embargo, la senescencia puede iniciar la translocación de compuestos orgánicos, como las proteínas, carbohidratos y lípidos, a las semillas como órganos de reproducción, que en muchas plantas cultivadas determinan el rendimiento por unidad de superficie.

Por ejemplo, el ATP cede su energía cuando su fosfato terminal se hidroliza para liberar ADP y fosfato inorgánico ($H_2PO_4^-$ o HPO_4^{2-} , llamados colectivamente Pi) de la forma siguiente:



Esta reacción se cataliza mediante la enzima ATP fosfohidrolasa (ATPasa) que al parecer se encuentra en todas las membranas de las células vivas (Salisbury y Ross, 2000). La deficiencia de fósforo en las plantas se manifiesta con un color verde oscuro, pero con mucha frecuencia las plantas, como el maíz, adquieren un color rojo y púrpura, los tallos quedan delgados y cortos (enanismo) cuando la deficiencia ocurre en etapas avanzadas del crecimiento, por lo que en consecuencia el crecimiento se detiene y la polinización suele ser escasa (Salisbury y Ross, 2000; Millar *et al.*, 1980).

POTASIO

El potasio es el elemento que desempeña una parte importante en muchos procesos fisiológicos vitales en la planta. Es esencial en todos los procesos metabólicos celulares; tiene un papel importante en la absorción de otros elementos minerales; regulariza el grado de respiración y tiene influencia en la transpiración. Es el único elemento que cuando no forma parte de los componentes vegetales permanece en forma iónica en la planta. Por esta razón se pierde fácilmente del follaje por lavado.

La disponibilidad, para la solución del suelo y las plantas, de elementos en el complejo de intercambio, depende de su energía de ligamiento, la cual es una medida de su firmeza con la cual los iones están retenidos. El aluminio, bario y fósforo tienen alta energía de ligamiento y, en consecuencia, se presentan a bajas concentraciones en la solución del suelo. Los iones como el calcio, potasio y magnesio poseen energía de ligamiento intermedia, mientras que el sodio y la mayoría de los aniones (cloruro, sulfato, entre otros) tienen energía de ligamiento débil, por lo que tienden a abundar en la solución del suelo; el fosfato constituye una excepción por estar, por lo común, fuertemente ligado a las partículas del suelo.

El K^+ es un ion monovalente que se combina de una forma temporal con ciertas enzimas, al mismo tiempo que las activa. Es decir, realiza funciones estructurales temporales transitorias, y no se conoce ninguna función estructural permanente que haga que este elemento sea esencial. Es necesario para que se forme la ATPasa transportadora de

H⁺, de tal manera que dicha ATPasa necesita K⁺ para llevar a cabo su actividad, aunque es posible que no transporte K⁺ a través de la membrana, al menos directamente (Salisbury y Ross, 2000).

Es un activador de muchas enzimas esenciales para la fotosíntesis y la respiración. También activa la enzima almidón sintetasa que es necesaria para formar el almidón en los cloroplastos, y aquéllas que catalizan la síntesis de proteínas. Este elemento también es tan abundante, que es uno de los contribuyentes más importantes para el potencial osmótico de las células y, por consiguiente, para su presión de turgencia. El K⁺ se enlaza iónicamente a la enzima piruvato quinasa, que es esencial en la respiración y el metabolismo de carbohidratos; de tal manera que este elemento es muy importante en todo el metabolismo que se realiza en las plantas.

También promueve que el crecimiento de las plantas sea más duro, lo cual es resultado del mayor grosor de las paredes de las células, por lo que las plantas tienen fuertes tallos que son menos propensos al acame. La deficiencia de potasio se manifiesta a través de una coloración amarilla (clorosis) en los bordes de las hojas, mismos que mueren a medida que pasa el tiempo, aunque también dicha deficiencia puede ocasionar pequeñas manchas de tejido muerto entre las venas de las hojas, lo que conlleva a que las plantas formen tallos delgados, débiles y que sean susceptibles de acame (Salisbury y Ross, 2000; Millar *et al.*, 1980).

MAGNESIO

El magnesio forma parte de la molécula de clorofila, y por ser muy soluble es de rápido transporte por toda la planta. Es un ion metálico que sirve para enlazar las subunidades que forman los ribosomas funcionales, por lo que de manera indirecta tiene gran importancia en la síntesis de proteínas; es un activador metálico de la mayoría de las enzimas que utilizan ATP u otros difosfatos o trifosfatos de nucleótidos como sustratos. Se absorbe en forma de ion divalente (Mg²⁺), y en su ausencia en las plantas, el primer síntoma que se produce es la clorosis de las hojas más viejas. Esta clorosis suele ser intervenal porque las células del mesófilo, situadas cerca de los haces vasculares, retienen la clorofila durante más tiempo que las células del parénquima que se encuentra entre ellos. Suele ser un limitador del suelo respecto al crecimiento vegetal. Además de formar parte de la clorofila, resulta ser un elemento esencial porque se combina con el ATP y activa muchas enzimas, como el fosfoenolpiruvato carboxilasa (PEP carboxilasa) que requiere Mg²⁺, necesarias en el proceso de fotosíntesis, la respiración y la formación de ADN y ARN. También activa a las enzimas que necesitan Mg²⁺ como cofactor para catalizar las reacciones que conllevan a la formación de sacarosa en el citosol.

Está involucrado en el ligamiento de enzimas y sustratos; por ejemplo, en reacciones que implican transferencia de fosfato desde el ATP, en las que el magnesio actúa como un eslabón que vincula la enzima a su sustrato. Además, puede servir para alterar la constante de equilibrio de una reacción mediante enlace con un producto, como, en ciertas reacciones de quinasa. También puede anexarse a un complejo inhibitorio enzimático. Es un catión que existe en la célula en una concentración relativamente alta, y se combina con los aniones ATP y ADP en una proporción de uno a uno para formar complejos bivalentes y monovalentes, respectivamente.

La deficiencia de este nutrimento se caracteriza por una decoloración característica de las hojas, acompañada ocasionalmente por caída foliar prematura; en el tabaco puede ocurrir clorosis o ahogamiento (sand drown) por la deficiencia del magnesio. En algodón, dicha deficiencia provoca color rojo púrpura con nervaduras verdes. En sorgo las hojas se tornan listadas con nervaduras verdes, pero adquieren color púrpura entre las nervaduras. También en maíz las hojas pueden ser listadas con nervaduras verdes, pero el color entre las nervaduras es amarillo. En frijol provoca hojas cloróticas. Las hojas más viejas son las primeras en manifestar la deficiencia de magnesio (Devlin, 1980; Millar *et al.*, 1980; Salisbury y Ross, 2000).

CALCIO

Este elemento es esencial para las plantas, toda vez que forma parte del Fotosistema II (FS II) que está integrado por seis polipéptidos integrales (intrínsecos) que se encuentran conectados entre sí de manera no covalente, en donde el Ca²⁺ es esencial para la fotólisis del agua, y hasta donde se incorpora con ayuda de tres polipéptidos extrínsecos (periféricos) que son codificados por genes del núcleo.

La planta lo absorbe del suelo en forma de ion Ca²⁺ divalente, y se sabe que los suelos contienen suficiente cantidad de Ca²⁺ para que se produzca un crecimiento vegetal adecuado. Actualmente se reconoce que todos los organismos mantienen concentraciones inesperadamente bajas de Ca²⁺ libre en el citosol, habitualmente menores de 1μM. Esto resulta cierto incluso cuando el calcio es tan abundante en muchas plantas, sobre todo leguminosas, como el fósforo, azufre y magnesio.

La mayor parte del calcio que contienen las plantas se encuentra en las vacuolas centrales, y en las paredes celulares se encuentra unido a ciertos polisacáridos llamados pectatos. En las vacuolas, el calcio suele precipitarse en forma de cristales de oxalato insolubles. En algunas especies, también se encuentra en forma de carbonato, fosfato o sulfato insoluble. Las concentraciones bajas de calcio, casi micromolares, deben mantenerse en parte para impedir la formación de sales de calcio insolubles, obtenidas a partir de ATP y de otros fosfatos orgánicos. Además, las concentraciones de Ca^{2+} por encima del margen micromolar inhiben la corriente citoplasmática.

Existen evidencias de que hay una bomba de calcio en la membrana plasmática de ciertas especies vegetales (Gräf y Weiler, 1989; Kasai y Muto, 1990). Esta bomba recibe el nombre de $(\text{Ca}^{2+} \text{ Mg}) \text{ ATPase}$, porque depende de un quelato de Mg^{2+} y ATP para llevar Ca^{2+} hacia fuera de la célula (Salisbury y Ross, 2000).

Una parte importante del calcio existente en el citosol se une de forma directa a varias enzimas, como la pequeña proteína calmodulina, con la que se une en forma reversible, haciendo que la citada proteína se modifique en su estructura y entonces active a varias enzimas (Cheung, (1982).

Es importante en la síntesis de pectina de la lámina media de la pared celular. También está involucrado en el metabolismo o formación del núcleo y las mitocondrias. Es fundamental para la mayoría de las plantas, por lo que una severa deficiencia ocasiona deterioro y muerte de éstas. Las partes meristemáticas son las primeras afectadas porque una disminución de calcio disminuye o impide la formación de nuevas paredes celulares, afectando así la división celular, de tal manera que la muy escasa o nula formación de pared celular ocasiona la formación de células polinucleadas, lo cual es típico en las plantas cuando les falta calcio.

La clorosis de los márgenes de hojas jóvenes (como lechuga y napa), la curvatura de la punta de hojas (enfermedad llamada "punta marchita") y la formación de raíces atrofiadas e incoloras, son síntomas característicos de deficiencia de calcio. Una planta de papa con deficiencia de calcio forma tubérculos pequeños y deformes; mientras que una planta de tomate puede formar frutos con la enfermedad llamada "pudrición apical del fruto". Puesto que la mayor parte del calcio de la planta se inmoviliza, una vez depositado, su deficiencia es más impactante en tejidos jóvenes, los tejidos más viejos pueden no ser afectados (Bidwell, 1979; Millar, 1980; Devlin, 1980; Salisbury y Ross, 2000).

MANGANESO

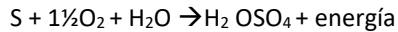
A este nutrimento se le puede encontrar en el suelo en los estados de oxidación Mn^{2+} , Mn^{3+} y Mn^{4+} , como óxidos insolubles; otra forma de su existencia es como quelato. Las plantas lo toman como catión divalente (Mn^{2+}), posterior a su liberación desde algún quelato o después de una reducción en óxidos con valencia superior sobre la superficie de las raíces (Uren, 1981). La forma bivalente en la solución del suelo es la que es absorbida por la planta, y esta forma también resulta de la reducción de Mn^{3+} y Mn^{4+} (Devlin, 1980).

Es un activador metálico de algunas enzimas respiratorias y de reacciones del metabolismo del nitrógeno y la fotosíntesis, así como para el metabolismo de la hormona ácido indolacético. El papel más importante del manganeso en la fotosíntesis está en la secuencia de reacciones mediante las cuales se derivan electrones del agua y se libera oxígeno a través de la membrana del tilacoide, con la participación de grupos de Mn que se localizan en dicha membrana, mismos que son estabilizados por la proteína 33 kDa. Lo anterior indica que tiene un papel estructural en los cloroplastos, los que son susceptibles a la luz cuando les falta el manganeso, y finalmente pierden su estructura y se desintegran bajo condiciones de disminución extrema de manganeso. Es un elemento que se requiere en los sistemas enzimáticos, para la síntesis de clorofila, y en las plantas está interrelacionado, de tal manera que un exceso de Mn ocasiona inactivación del hierro (Bidwell, 1979; Devlin, 1980; Millar *et al.*, 1980; Lea and Leegood, 1993; Salisbury y Ross, 2000).

Cuando el Mn falta o es muy escaso en el suelo, suelen ocurrir los siguientes síntomas: enanismo en las plantas de tomate, frijol, avena tabaco, etc., acompañado de un amarillamiento intervenal de las hojas superiores, ya que las nervaduras continúan verdes por más tiempo. En suelos orgánicos alcalinos las hojas de las cebollas quedan cortas y se enroscan sin que los bulbos estén maduros y listos para la cosecha; en este mismo tipo de suelos el apio manifiesta amarillamiento, al igual que las espinacas, lechugas y papas, por lo que frecuentemente no tienen la calidad para ofertarlas al consumidor; otros síntomas son el amarillamiento moteado de la remolacha azucarera y la macha fangosa de los chícharos; cuando los cloroplastos pierden clorofila y granos de almidón, se tornan de color verde pálido, se vacuolizan, son de apariencia granulosa y finalmente se desintegran ocasionando la muerte del tejido foliar (Devlin, 1980; Millar *et al.*, 1980; Bidwell, 1979; Salisbury y Ross, 2000).

AZUFRE

Este nutriente se absorbe del suelo como anión sulfato divalente (SO_4^{2-}). Las raíces lo metabolizan solamente hasta el nivel necesario, y el sobrante o exceso de sulfato se moviliza por el xilema, sin cambios moleculares, a las zonas aéreas. El azufre es oxidado a sulfato (SO_4^{2-}) por parte de la bacteria *Thiobacillus*, una vez que dicho elemento se libera en el suelo mediante descomposición de la materia orgánica; esta transformación del azufre es la forma benéfica en que puede ser más fácilmente utilizado por la planta, de tal manera que la reacción es la siguiente:



Sin embargo, este elemento también se puede presentar en forma elemental o de sulfuros de hierro (FeS , FeS_2) que no están disponibles para las plantas, pero éstos pueden ser oxidados por microorganismos a la forma de sulfato (Millar *et al.*, 1980; Salisbury y Ross, 2000).

El azufre es de importancia principalmente como constituyente de compuestos orgánicos como los glúcidos y aminoácidos (cistina, cisteína y metionina), por lo que es un componente importante de las proteínas y del aceite de las crucíferas y la mostaza, así como de sustancias activas biológicamente como el tripéptido glutatión, las vitaminas sulfuradas biotina, tiamina y la Acetil Coenzima A. También se puede encontrar en aquellas sales que salen de las hojas antes de caer de los caducifolios, en donde ocurre una movilización de sales que salen antes de su caída y que contienen elementos como nitrógeno, potasio, fósforo, azufre, cloro y, en determinadas condiciones, hierro y manganeso.

La transformación del azufre en compuestos orgánicos se lleva a cabo mediante un derivado de la adenosina, el 3'-fosfoadenosin 5'-fosfosulfato (PAPS), el cual se forma a expensas del ATP, de donde el azufre se reduce a sulfuro, el cual a su vez se combina con acetil serina para formar el aminoácido cisteína. La reducción del sulfato se lleva a cabo tanto en las raíces como en las partes aéreas de algunas especies, pero la mayor parte del azufre que se transporta por el xilema hacia las hojas, está en forma no reducida (SO_4^{2-}). Ocurre cierto transporte de vuelta hacia las raíces y hacia otras partes de la planta a través del floema, por el que se transportan tanto SO_4^{2-} libre como compuestos orgánicos azufrados. El proceso de reducción del SO_4^{2-} que ocurre en las hojas se realiza en los cloroplastos, mientras que en las raíces se efectúa en los plastidios.

El primer paso para la asimilación de sulfato en todas las células es la reacción de SO_4^{2-} con ATP, con lo que se produce 5'-fosfosulfato de adenosina (APS) y pirofosfato (PPi). El azufre del APS se reduce en los cloroplastos mediante los electrones que dona la ferredoxina reducida, mientras que en los proplastidios la reducción se lleva a cabo porque el NADPH dona los electrones.

El sulfuro (libre o unido) que resulta de la reducción del APS no se acumula, porque rápidamente se convierte en compuestos orgánicos azufrados, especialmente cisteína y metionina. La mayor parte del azufre vegetal (aproximadamente el 90%) se encuentra en la cisteína o en la metionina de las proteínas, pero pequeñas cantidades de cisteína se incorporan en la coenzima A, y se utilizan trazas de metionina para formar S-adenosil-metionina, el cual es un compuesto importante porque su grupo metilo puede transferirse para ayudar a formar las ligninas y las pectinas de las paredes celulares, las antocianinas y las clorofilas (Bidwell, 1979; Devlin, 1980; Freifelder, 1988; Conn *et al.*, 2002; Morales y Ávila, 2004).

La insuficiencia de S se manifiesta a través de una clorosis general (amarillamiento o verde claro) de las plantas, así como con un retraso del crecimiento, lo anterior significa similitud a la deficiencia de nitrógeno, y en algunas especies luego puede ocurrir la formación de pigmentos antocianicos (coloración rojiza), pero en las plantas con deficiencia de azufre se da una clorosis que empieza por las hojas más jóvenes, aunque en deficiencias muy severas todas las hojas se tornan verde claro o amarillentas (Devlin, 1989; Millar *et al.*, 1980).

HIERRO

Los suelos no suelen presentar deficiencias de hierro, pero en ellos pueden escasear las formas intercambiables y solubles de hierro. Algunos minerales, óxidos hidratados como la limonita ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) y algunos sulfuros contienen cantidades apreciables de hierro, el cual es más fácil de absorber por las plantas en su forma ferrosa, aunque también puede ser absorbido significativamente en forma de ion férrico.

La disponibilidad del hierro para la planta está estrechamente ligada al pH del suelo, de tal manera que en un suelo ácido el hierro pasa a la forma disuelta en la solución de éste y entonces es absorbible por la planta; sin embargo, en suelos neutros o alcalinos el hierro es mucho más insoluble y está menos disponible para la planta; esto último se hace más evidente a partir de un pH de 8. No obstante, el hierro es susceptible de ser absorbido por las raíces, cuando éstas se ponen en contacto directo con las partículas del suelo ricas en este elemento.

El hierro es el microelemento que las plantas requieren más en relación a otros elementos menores, y su oxidación por medio de las bacterias hace que esté menos soluble en el suelo, o su unión con el molibdeno forma compuestos insolubles y, por lo tanto, menos disponible para las plantas superiores.

Su importancia se relaciona con dos hechos interesantes: el hierro forma parte del sitio catalítico de muchas enzimas óxido-reductoras, y es esencial para la formación de clorofila, aunque no forma parte de la molécula. La importancia del hierro en proteínas heme (citocromos y citocromo oxidasa) de la cadena transportadora de electrones, se deriva de su capacidad de existir en forma oxidada o reducida; es decir, que puede adquirir o perder un electrón, sufriendo un cambio de valencia al hacerlo. Entonces este ion metálico puede encontrarse formando parte de grupos prostéticos de enzimas, necesarios para la actividad catalítica de las mismas, o bien, unido directamente a las enzimas que carecen de grupos prostéticos llamadas coenzimas.

Este microelemento también está presente en varias enzimas oxidantes como la catalasa y peroxidasa, en las cuales su valencia no cambia. También se encuentra en enzimas sin grupo heme como las flavoproteínas y la ferredoxina; además, puede estar involucrado en la estructura de lípidos lamelares del núcleo, cloroplastos y mitocondrias.

El hierro acumulado en las hojas más viejas se encuentra relativamente inmóvil en el floema, igual que en el suelo, probablemente porque se precipita internamente en las células de las hojas en forma de óxido insoluble o de compuestos de fosfato férrico, orgánicos o inorgánicos. En los cloroplastos se almacena una forma estable y abundante de hierro existente en las hojas, lo cual es conocido como fitoferritina, lo que a su vez consiste en un complejo de hierro y proteína.

Resumidamente se puede decir que el hierro es esencial porque forma parte de algunas enzimas y numerosas proteínas que trasladan electrones durante la fotosíntesis y la respiración. Experimenta oxidaciones y reducciones alternativas, entre los estados Fe^{2+} y Fe^{3+} , cuando se comporta como portador de electrones en las proteínas.

Con frecuencia se observan deficiencias de hierro en especies vegetales que son muy sensibles, como en la familia de las rosas, árboles frutales y maíz. El síntoma de deficiencia de hierro más fácilmente observado es la intensa clorosis de las hojas. En general, las hojas jóvenes se ven especialmente afectadas, mientras que las más viejas no presentan señales de clorosis, lo cual es debido a la relativa inmovilidad del hierro. Un rasgo característico de la clorosis por falta de hierro es su típica localización internervial, caracterizada porque las nervaduras de las hojas presentan un color verde, en contraste con el color amarillo de la lámina foliar que se encuentra entre las nervaduras. Es rara la clorosis o amarillamiento total de las hojas jóvenes; no obstante, en condiciones de severa deficiencia, hasta las nervaduras pueden adquirir el aspecto clorótico o amarillo (Devlin, 1980; Millar et al., 1980; plaster, 2000; Salisbury y Ross, 2000).

COBRE

El cobre se absorbe por las plantas principalmente de forma activa como Cu^{2+} en suelos bien aireados, asimismo, como ion cuproso monovalente en suelos húmedos y con baja cantidad de oxígeno, y en algunos casos como complejo. Se asocia con varias enzimas, ya sea como activador o formando parte de ellas, por lo que interviene en multitud de procesos de oxidación-reducción. Por ejemplo, es parte de la enzima polifenol oxidasa y actúa en el sistema enzimático ascórbico oxidasa, responsable de la oxidación del ácido ascórbico (vitamina C) a dehidroascórbico, es así como dicha vitamina ejerce su efecto protector sobre la oxidación.

Tiene la propiedad de formar parte de la plastocianina de cloroplastos, pero también es un ion metálico que forma parte de grupos prostéticos de enzimas, como el citocromo oxidasa; sin embargo, también puede estar unido directamente a las enzimas que carecen de grupos prostéticos llamadas coenzimas. Tanto en los grupos prostéticos de las enzimas como en las coenzimas, su presencia es necesaria para la actividad catalítica de las sustancias en cuestión. Es un elemento que forma parte de varias enzimas importantes, especialmente para la formación de clorofila.

Actualmente existen muchos indicios de que el cobre forma parte de los lugares activos de una o más de las proteínas receptoras del etileno, las cuales quizás se encuentran en la membrana plasmática de la célula.

En suelos orgánicos con Cu fuertemente retenido (deficiencia), el crecimiento de las plantas es anormal, pero éste se puede corregir aplicando compuesto de cobre, mismos que en cultivos como la cebolla, espinaca, lechuga y zanahoria inducen mejor coloración, en esta última y la remolacha incrementa el contenido de azúcar, y ocasionan mejor sabor del producto en muchas plantas cultivadas, en otras ocasiones la deficiencia de Cu conlleva a una marchitez y color oscuro, clorosis y necrosis en las hojas apicales; la típica deficiencia se manifiesta cuando las hojas se disponen en forma de roseta (apretadas) y adquieren color blanco en las puntas; de igual manera la muerte regresiva de árboles frutales, en los que las hojas se marchitan y caen, la corteza se pone áspera y se agrieta, con secreción de sustancias gomosas (Bidwell, 1979; Millar et al., 1980; Devlin, 1980; Salisbury y Ross, 2000).

CLORO

Es el último nutrimento que fue agregado a la lista de nutrimentos esenciales para el crecimiento de las plantas. Se le atribuyen regulación de presión osmótica y equilibrio catiónico. Es un nutrimento que se puede encontrar en las sales que salen de las hojas de plantas caducifolias (Devlin, 1980; Millar et al., 1980).

El cloro se absorbe desde el suelo en forma de ion cloruro (Cl^-) y en su mayor parte se conserva así, aunque en los vegetales se han detectado más de 130 compuestos orgánicos que contienen cloro en cantidades mínimas (Engvild, 1986). Uno de los más interesantes es el ácido 4-cloroindolacético, que debe ser una hormona del tipo de auxina. El cloro (Cl^-) es un elemento esencial para las plantas, ya que forma parte del complejo central del Fotosistema II (FS II) que está integrado por seis polipéptidos integrales (intrínsecos) que se encuentran conectados entre sí de manera no covalente, por lo que el Cl^- juega un papel importante en la fotosíntesis. Se cree que su incorporación al FS II ocurre con ayuda de tres polipéptidos extrínsecos (periféricos) codificados por genes del núcleo. Además de ser esencial para la fotosíntesis y la fotólisis del agua, también ayuda a regular la apertura y cierre de los estomas.

Es un elemento que es necesario en cantidades muy pequeñas, aún si se considera que puede ser uno de los aniones que más abundan en las plantas. Es único en su género, porque son muy pocas las probabilidades de que haya necesidad de él como fertilizante, pues existe en la brisa de los océanos y por medio de la lluvia se precipita y agrega al suelo. Además, forma parte de fertilizantes potásicos utilizados actualmente en la agricultura, siendo éstos otra forma mediante la cual el Cl se agrega a los suelos (Millar et al., 1980), y se ha demostrado que incrementa el crecimiento de las plantas de tomate, y en ausencia de este nutrimento la producción de frutos disminuye (Bidwell, 1979; Salisbury y Ross, 2000). En pepino se mejora el crecimiento cuando se aplican dosis de 20, 30 ó 50 mg L^{-1} de Cl; asimismo el rendimiento de frutos en t ha^{-1} , mientras que en tomate el rendimiento no disminuye por el tratamiento con las tres dosis, pero tampoco se incrementa sustancialmente; sin embargo, la menor dosis es más adecuada para mejorar la concentración de sólidos solubles totales (Cázares, et al., 2022).

MOLIBDENO

En el suelo existe principalmente como sales de molibdato (MoO_4^{2-}) y de MoS_2 . La primera forma se le encuentra en estado redox (valencia) de Mo^{6+} , aunque en las sales de sulfitos existe en forma de Mo^{4+} . En muchos suelos el molibdeno (Mo) forma parte de ellos en pequeñas cantidades y se absorbe fácilmente en suelos con pH elevado, por lo que su disponibilidad es muy pobre en suelos ácidos, graníticos (resultan de la meteorización del granito) y arenosos. Su papel más importante está en la reducción de nitratos y la fijación del nitrógeno.

Este elemento es un componente de las enzimas nitrato reductasa y nitrogenasa. Forma parte de la enzima xantina deshidrogenasa que degrada a la adenina y guanina: también es parte estructural esencial de la enzima oxidasa que convierte el aldehído del ácido abscísico en la hormona ABA. Es necesario para las bacterias que fijan nitrógeno, como las de leguminosas y las de vida libre. Su deficiencia provoca disminución de nitrógeno orgánico, lo que a su vez conlleva a síntomas de deficiencia de nitrógeno. A pesar de la escasa necesidad por parte de las plantas, existe una deficiencia generalizada que se confunde con la deficiencia de nitrógeno. Con mucha frecuencia su deficiencia ocasiona síntomas como el latigazo en la coliflor y el brécol, en las que no incluye clorosis; otras veces el síntoma es una clorosis intervenal en las hojas más viejas o de la mitad del tallo, pero que después se presenta en las hojas jóvenes. La formación de hojas muy retorcidas y que posteriormente mueren en la coliflor, es otro síntoma que provoca la deficiencia de Mo (Bidwell, 1979; Millar et al., 1980; Devlin, 1980; Plaster, 2000; Salisbury y Ross, 2000).

ZINC

Este nutrimento se puede encontrar en la biotita, magnelita y hornblenda, materiales ferromagnésicos, mismos que al mineralizarse liberan Zn^{2+} que con facilidad queda adsorbido en las partículas del suelo y materia orgánica, y es intercambiable, aunque su disponibilidad es afectada por el pH del suelo, de tal forma que entre mayor sea el pH (≥ 6.0) la disponibilidad disminuye, y esto ocasiona que aparezcan síntomas de deficiencia de Zn, así que la aplicación de difosfato cálcico en suelos conlleva a mermar la absorción de Zn, quizás por la formación de fosfato de Zn relativamente insoluble en la solución del suelo (Devlin, 1980).

El zinc se absorbe en forma de Zn^{2+} divalente, y probablemente a menudo a partir de quelatos de zinc. Es un microelemento que puede presentarse en combinación directa con ciertas enzimas, por lo que tiene gran importancia en el metabolismo de sustancias en las plantas. Debido a que una deficiencia de este elemento produce una clorosis intervenal en las hojas de maíz, sorgo, alubia y árboles frutales, ahora se conoce que participa en la formación de clorofila o bien impide la destrucción de la misma. El retraso del crecimiento del tallo que se produce cuando existe una deficiencia de Zn se debe en parte a que quizás sea necesario para producir la hormona del crecimiento ácido indolacético (auxina). Muchas enzimas contienen Zn unido fuertemente, que resulta esencial para su correcto funcionamiento, y considerando todos los organismos, se conocen más de 80 enzimas de ese tipo (Vallee, 1976; Bidwell, 1979; Salisbury y Ross, 2000).

BORO

Este elemento se libera por la meteorización y se introduce a la solución del suelo, desde donde se absorbe por las plantas casi siempre en forma de ácido bórico sin disociar H_3BO_3 . Puesto que el boro (B) se acumula en la materia orgánica cerca de la superficie del suelo, entonces las condiciones que limitan la descomposición de dicha materia también limitan la cantidad de B libre (Plaster, 2000). En algunas plantas, como las diatomeas, el boro forma parte de la pared celular rica en silicio, y se ha comprobado que el B interviene en multitud de procesos biológicos importantes, como la síntesis de proteína, hormonas de las plantas, ADN y ARN, por lo que su deficiencia ocasiona falta de crecimiento y alargamiento normal de las raíces en las puntas. También provoca una desactivación de la división celular en el ápice del tallo y de las hojas más jóvenes (Salisbury y Ross, 2000).

Puesto que no es posible realizar un proceso biológico sin la intervención de enzimas, se ha llegado a la conclusión que el B actúa en algunos sistemas enzimáticos como constituyente o como componente activo y esencial del sustrato donde tiene lugar la reacción biológica.

Los síntomas debidos a la deficiencia del B se manifiestan en tallos agrietados en el apio, putrefacción del corazón en la remolacha azucarera, acorchamiento interno de la manzana, amarillamiento de la alfalfa, putrefacción superior en el tabaco y pudrición del corazón en el nabo. En muchas plantas los brotes en las puntas mueren (muerte de meristemas), y cuando los brotes laterales crecen el ápice terminal muere a su vez. La deficiencia de B también ocasiona un crecimiento incompleto de la semilla o del grano, como el hoyo o fístula del corazón de los cacahuates (Bidwell, 1979; Millar *et al.*, 1980; Plaster, 2000; Salisbury y Ross, 2000).

SILICIO

Es necesario para el crecimiento de diatomeas, ya que concha exterior se compone de silicio. Cereales como el arroz y el maíz crecen y se desarrollan mejor con adición de Silicio el suelo, en los que también disminuye la transpiración e incrementa resistencia a patógenos, quizás porque se acumula en las paredes celulares. También disminuye la deficiencia de fosfato, toda vez que este mineral se absorbe más firmemente que el fosfato en las partículas del suelo y hace que éste último se mueva hacia la solución del suelo; asimismo, reduce la toxicidad del hierro y el manganeso porque ocasiona la precipitación en dicha solución (Bidwell, 1979).

El silicio (Si) forma parte de la escoria de silicato de calcio y del silicato de potasio, siendo éstas las fuentes de silicio más empleadas para el manejo de insectos plagas. Es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre, y considerado no esencial para las plantas superiores. Sin embargo, su absorción puede ocasionar efectos benéficos para algunos cultivos, como la resistencia a plagas. Principalmente sobre las especies de insectos que se ubican en los órdenes Lepidóptera, Hemíptera y Thysanóptera (Castellanos *et al.*, 2015).

Por su abundancia en la corteza terrestre, es de esperarse que este elemento juegue algún papel en los seres vivos, como en las diatomeas (organismos unicelulares), organismos marinos multicelulares como las esponjas, y en

plantas terrestres como las equisetáceas y otras de interés para el hombre, como el arroz, caña de azúcar y calabaza. En ausencia de Si las plantas vasculares son más vulnerables a patógenos, insectos fitófagos y herbívoros. El Si también les confiere resistencia al estrés biótico y abiótico (Aguirre *et al.*, 2007). En pepino (*Cucumis sativus* L.) el rendimiento de frutos en t ha⁻¹ se puede incrementar sustancialmente con Si en dosis de 30 ó 50 mg L⁻¹, lo que en tomate no ocurre cuando es fertilizado con las dosis anteriormente mencionadas. No obstante, la cantidad más alta de sólidos solubles totales en frutos de pepino se puede lograr con la proporción volumen:volumen (v:v) de 20:20 mg L⁻¹ de Si:Cl, mientras que en tomate el mayor incremento se puede lograr con 20 mg L⁻¹ de Cl (Cázares, *et al.*, 2022).

DISCUSION

Los resultados de esta investigación propician la justificación científica acerca de que algunos nutrimentos son más demandados que otros en la nutrición vegetal y, por tanto, la clasificación que se ha realizado en macronutrimentos (1000 mg kg⁻¹ de materia seca), o en micronutrimentos (100 mg kg⁻¹ de materia seca), como lo refieren Robb y Peirpont (1983). Asimismo, la afirmación de que

en las células del organismo vivo se manifiesta una fase de carácter constructor (anabólica) y otra de tipo destructor (catabólica) de los nutrimentos y sustancias, por lo que simultáneamente se realizan procesos tanto sintéticos como de degradación, y la energía liberada de la descomposición de algunos compuestos puede utilizarse para la síntesis de otros componentes celulares (Conn *et al.*, 2002). Esto significa que algunos nutrimentos forman parte de la estructura de un compuesto importante como las enzimas, mientras que otros tienen la función activadora de enzimas. Sin embargo, varios de estos elementos forman parte de enzimas esenciales y también ayudan a catalizar la reacción química en la que participa la enzima. El Mg, N y S son ejemplos de lo más claro respecto a qué elementos realizan ambas funciones. No obstante, la mayoría de los micronutrimentos son especialmente importantes porque activan enzimas (Robb y Peirpont, 1983).

Con respecto a los síntomas de deficiencia, la baja concentración o falta de macronutrimentos en la solución del suelo, como el N, P y K, pueden ocasionar cambios en la coloración de hojas y consistencia de tallos, pero también la escasez o falta de micronutrimentos en la solución del suelo, como el Ca, B, Fe, Mg, Mn, etc., se manifiesta con cambios en el color de hojas y consistencia de tallos, como lo reportaron Salisbury y Ross (2000).

Estos resultados también dejan claro que en ocasiones el síntoma de deficiencia de un elemento no es porque éste falte en la solución del suelo, sino porque en dicha solución falta otro elemento que es parte de la coenzima necesaria para activar a la enzima que cataliza la reacción que conlleva a la síntesis de la molécula

CONCLUSIONES

Los nutrimentos son elementos que pueden formar parte de sustancias determinantes de características en las plantas, como el nitrógeno y magnesio en la clorofila que ocasiona el color verde, como el nitrógeno y fósforo en el ADN, el azufre en el syn-propanotial-S-óxido que producen las cebollas, entre muchos compuestos más. Otros nutrimentos forman parte de proteínas activas (enzimas) necesarias para formar sustancias como las antes mencionadas, mientras que otros son parte importante de las coenzimas que son necesarias para la síntesis de sustancias, o bien forman parte de paredes celulares y tejidos vegetales, y cuando no forman parte de éstos, permanecen en forma iónica y pueden ser lavados con facilidad del follaje, como el potasio. De tal manera que los síntomas de deficiencia pueden deberse a la falta directa del nutrimento en las enzimas necesarias para formar las moléculas o por falta del nutrimento en la formación de coenzimas necesarias para activar a las enzimas que se requieren para sintetizar sustancias que conllevan a la multiplicación y elongación celular y, en consecuencia, al crecimiento, desarrollo y senescencia de las plantas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguirre C., Chávez T., García P. y Ray J. C. (2007). El silicio en los organismos vivos. *Revista Interciencia* 32(8): 504-509.
2. Castellanos, G. L., De Mello P. R. y Cid Silva C. C. N. (2015). El Silicio en la resistencia de los cultivos. *Revista Cultivos Tropicales* 36 No. Especial: 16-24.
3. Cázares, F. L. Ll., Partida R. L. Velázquez A, T. de J., Ayala T. F., Díaz V. T., Yáñez J. M. G. y López O. C. A. (2022). Silicio y cloro en el crecimiento, rendimiento y calidad postcosecha de pepino y tomate. *Terra Latinoamericana* 40, 1-11, e994, doi.org/10.28940/terra.v40i0.994.
4. Cheung, W. Y. (1982). Calmodulin. *Scientific American*, 246(6), 62-72. <http://www.jstor.org/stable/24966614>

5. Calmodulin. Scientific American 246(6): 62-70.
6. Conn, E. E., Stumpf P. K., Bruening G. y Doi R. H. (2002). Bioquímica Fundamental. Editorial LIMUSA, S. A. México, D. F. 736 p.
7. Devlin, C. P. (1980). Fisiología Vegetal. Ediciones Omega S. A., Barcelona, España.
8. Díaz, V. T., Partida R. L., Suárez F. Y., Lizárraga J. R. y López L. A. (2014). Uso eficiente del agua y producción óptima en maíz, con el uso de cuatro dosis de nitrógeno. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias 23(1): 32-36.
9. Freifelder, D. (1988). Fundamentos de Biología Molecular. Editorial Acribia, S. A. Zaragoza, España.
10. Kasai, M., and Muto S. (1990). Ca²⁺ pump and Ca²⁺/H⁺ antiporter in plasma membrane vesicles isolated by aqueous two-phase partitioning from corn leaves. Journal of Membrane Biology 114: 133-142. <https://doi.org/10.1007/BF01869094>
11. Lea C. P, and Leegood C. R. (1993). Plant Biochemistry and Molecular Biology. Editorial John Wiley & Sons Ltd, Baffins Lane, Chichester. West Sussex PO19 1UD, England.
12. Millar, C.E., L.M. Turk y H.D. Foth. (1980). Fundamentos de la Ciencia del Suelo. Editorial Continental. México, D.F
13. Morales, J. E. y Ávila E. (2004). Necesidades de metionina + cistina para pollos de engorda en iniciación. Rev. Avances en Investigación Agropecuaria 8(1): 1-7. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=83780106>
14. Plaster, J. E. (2000). La Ciencia del Suelo y su Manejo. Editorial Paraninfo. Madrid, España. 419 p.
15. Salisbury, F. B. y Ross C. W. (2000). Fisiología de las Plantas. Editorial Paraninfo Thomson Learning, Madrid, España. 988 p.
16. Strickberger M. W. (1978). Genética. Ediciones Omega S. A. Barcelona.
17. Uren, N. C. (1981). Chemical reduction of an insoluble higher oxide of manganese by plant roots. Journal of plant nutrition 4(1): 65-71. <https://doi.org/10.1080/01904168109362901>
18. Vallee, B. L. (1976). Zinc biochemistry: A perspectiva. Trends in Biochemical Sciences 1: 88-91.