

*Artículo de revisión*

**Nutrición y fertilización con micronutrientes y su efecto en palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jack). Revisión**

Nutrition and fertilization with micronutrients and their effect on oil palm (*Elaeis guineensis* Jack).  
Review.

**Yepes Orjuela Rodrigo Hernando<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Universidad de Pamplona, Facultad de Ciencias Agrarias. Pamplona, Norte de Santander, Colombia. Email: [ryepes2010@gmail.com](mailto:ryepes2010@gmail.com)

**RESUMEN**

La nutrición y fertilización con micronutrientes en cultivos de importancia económica día a día toma más interés por su efecto en el balance nutricional, la producción y calidad de las cosechas y más recientemente en la prevención y tolerancia a stress biótico y abiótico; la palma de aceite no es ajena a dicha situación por tratarse de un cultivo tecnificado altamente extractor de nutrientes, desarrollado en suelos de moderada a baja fertilidad. Se resumen y analizan diferentes aspectos relacionados con la esencialidad de los micronutrientes, sus funciones a nivel bioquímico, los factores y procesos que inciden directa e indirectamente en su disponibilidad y absorción, como el material parental, la mineralogía, el uso de la materia orgánica, el pH e interacciones entre nutrientes, la fertilidad física del suelo y el manejo agronómico, soportados con algunos trabajos experimentales. Se presentan los requerimientos de algunos micronutrientes y su distribución en órganos vegetativos y frutos en palma de aceite; referencias de niveles críticos en hoja 17 de varios autores, asimismo, una guía de niveles críticos en suelos palmeros, pero también los estándares generales de interpretación de suelos con fines agrícolas. Los trabajos de fertilización muestran efectos positivos en la calidad y rendimiento de frutos de boro, zinc, cobre, cloro, hierro y manganeso, aunque este campo requiere más investigación, así como deficiencias manifiestas en plantaciones, a excepción del molibdeno; se reportan toxicidades de aluminio, níquel, dependientes del clima y material parental mientras que cobre, boro y molibdeno se deben más a aplicaciones excesivas de fertilizantes. Se espera que la información presentada aclare aspectos del manejo de los micronutrientes, permita inferir posibles deficiencias o excesos en diferentes situaciones de suelos y sirva como base para futuros trabajos de investigación en el tema ya que se requiere precisar efectos en diferentes ambientes.

**Palabras clave:** Esencial, Fisiología, Disponibilidad, Absorción, Minerales, Deficiencias.

**ABSTRACT**

The nutrition and fertilization with micronutrients in crops of economic importance every day take more interest due to its effect on the nutritional balance, the production and quality of the crops and more recently in the prevention and tolerance to biotic and abiotic stress; The oil palm is not alien to this situation as it is a highly technified nutrient-extracting crop, developed in soils of moderate to low fertility. Different aspects related to the essentiality of micronutrients, their functions at the biochemical level, the factors and processes that directly and indirectly affect their availability and absorption, such as parental material, mineralogy, the use of organic matter, are summarized and analyzed. the pH and interactions between nutrients, the physical fertility of the soil and the agronomic management, supported with some experimental works. The requirements of some micronutrients and their distribution in vegetative organs and fruits in oil palm are presented; Critical level references on sheet 17 by various authors, likewise, a guide to critical levels in palm soils, but also the general standards of interpretation of soils for agricultural purposes. The fertilization works show positive effects on the quality and yield of boron, zinc, copper, chlorine, iron and manganese fruits, although this field requires more research, as well as manifest deficiencies in plantations, with the exception of molybdenum; Aluminum, nickel, climate dependent toxicities and parent material are reported while copper, boron and molybdenum are due more to excessive fertilizer applications. It is expected that the information presented will clarify aspects of micronutrient management, allow inferring possible deficiencies or excesses in different soil situations and serve as a basis for future research work on the subject since it is necessary to specify effects in different environments.

**Keywords:** Essential, Physiology, Availability, Absorption, Minerals, Deficiencies.

Recibido: 01-07-2019

Aceptado: 15-08-2019

Publicado: 18-08-2019

Autor de correspondencia: Rodrigo Hernando Yepes Orjuela.  
Universidad de Pamplona, Facultad de Ciencias Agrarias.  
Pamplona, Norte de Santander, Colombia. Email:  
[ryepes2010@gmail.com](mailto:ryepes2010@gmail.com)

## **Introducción**

En los últimos quince años el área dedicada al cultivo de la palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq) en Colombia ha crecido a una mayor tasa que en años previos, si se tiene en cuenta que los primeros cultivos con carácter comercial se establecieron en el país hace más de cincuenta años. A las razones económicas, sociales y ambientales a las que tradicionalmente se ha atribuido el interés nacional por el cultivo, se suma ahora su papel en la producción sostenible de biocombustibles. Se estima que en 2013 el área sembrada con este cultivo en el país superará las 470.000 ha (Munévar, 2008).

Para su nutrición las plantas utilizan pequeñas cantidades de microelementos, oligoelementos o elementos traza. Comúnmente no se aplican al suelo mediante el uso de fertilizantes comerciales, a pesar de que se han extraído durante muchos siglos y no ha habido ninguna reposición sistemática. Esto ha ocasionado una merma significativa de sus existencias, con el subsiguiente efecto sobre la productividad vegetal (Castro y Gómez, 2010).

La demanda de micronutrientes depende de la especie vegetal considerada, del cultivar y los rendimientos obtenidos. Los micronutrientes cobran, comparativamente, mayor importancia en la producción de cultivos intensivos que en los extensivos. En estos últimos, su deficiencia afecta el rendimiento, mientras que en los cultivos intensivos afecta, además, factores de calidad tales como firmeza y color de frutos, pudiendo ocasionar trastornos fisiológicos en postcosecha (Ferraris, 2013).

Investigaciones recientes sobre fisiología vegetal han demostrado que los micronutrientes desempeñan un importante papel en la resistencia de las plantas al estrés abiótico y al biótico (particularmente en la resistencia a enfermedades y plagas) (López; 1998; Acosta *et al.*, 2007; Calderón, 2008; De Ávila *et al.*, 2011; Nur *et al.*, 2012). Las razones de esta resistencia y las consecuencias con respecto al manejo del cultivo se van aclarando día a día (López, 1998; Kirkby y Römheld, 2008).

De igual manera, se ha reconocido que los micronutrientes son vitales para el crecimiento reproductivo de las plantas y el significado de esto, tanto a nivel fisiológico como a nivel agronómico, todavía está siendo investigado. La enorme importancia de los micronutrientes para la salud de las plantas, seres humanos y animales los coloca en una posición de importancia en la investigación biológica, de las cuales el sistema suelo-planta es de especial interés (Marschner, 1995; Kirkby y Römheld, 2008<sup>a</sup>; 2008b; 2008c)

Por lo anterior, en este estudio nos interesa revisar la información de la investigación tanto de las funciones de los micronutrientes en las plantas como de las relaciones suelo – planta-ambiente con énfasis en la palma de aceite, iniciando por entender la movilidad (en suelo y planta) , la absorción, traslocación y uso de asimilados (nutrición) , así como, resaltar los factores (suelo, cultivo y ambiente) y procesos (químicos, físicos y biológicos) relacionados con su

disponibilidad a corto y mediano plazo y las posibles respuestas en la fertilización

## **Funciones de los micronutrientes en las plantas**

Un elemento esencial debe estar incluido directamente en la nutrición de la planta, por ejemplo, como un constituyente de un metabolito esencial o para la acción de un sistema de enzimas (Marschner, 1995; López, 1998; Ferraris, 2013). Todos los nutrientes esenciales son igualmente importantes para el crecimiento normal de la planta y la producción del cultivo, puesto que, en la ausencia de un solo nutriente esencial, la planta es incapaz de completar su ciclo vital.

Algunos investigadores, consideran que el segundo criterio (función específica) no es totalmente correcto. Por ejemplo, se requiere molibdeno para la fijación del nitrógeno, pero en algunas especies, el molibdeno puede ser sustituido por vanadio (V). También el cloro puede ser sustituido, en parte, por el bromo (Br) (Castro y Gómez, 2010; Agroestrategias, 2013)

Los micronutrientes también forman complejos enzimáticos ligando una enzima con un sustrato (Fe y Zn). Al momento se conoce que varios micronutrientes (Mn, Zn y Cu) están presentes en las isoenzimas superóxido dismutasa (SD o SOD), las cuales actúan como sistemas de barrido para erradicar radicales de oxígeno tóxicos, protegiendo las biomembranas, ADN, clorofila y proteínas. Para los no metales como B y Cl no existen enzimas u otros compuestos orgánicos esenciales bien definidos que contengan estos micronutrientes. Sin embargo, se ha establecido que el B es un constituyente esencial de las paredes celulares. Las principales funciones de los micronutrientes se presentan en la Tabla 1 (Kirkby y Römheld, 2008a; 2008b; 2008c; Alloway, 2008; Calderón, 2008; Castro y Gómez, 2010).

### **Descripción funciones micronutrientes**

#### *Hierro (Fe)*

La alta afinidad de Fe para formar complejos con varios ligandos (por ejemplo, ácidos orgánicos y fosfatos) y la facilidad de cambio de valencia son las dos características más importantes que forman parte de los numerosos efectos fisiológicos de este nutriente.

Los dos principales grupos de proteínas que contienen Fe son las proteínas hemo y las proteínas Fe-S. Las proteínas hemo se caracterizan por la presencia de un complejo Fe hemo porfirina, el cual actúa, por ejemplo, como grupo prostético de citocromos que facilitan el transporte de los electrones en la respiración. Otras proteínas hemo incluyen la citocromo oxidasa, catalasa, peroxidasa y leghemoglobina, una proteína que confiere el color rosado a los nódulos en las raíces de las leguminosas. (Castro y Gómez, 2010; Pilarte, 2013). Las actividades de las enzimas hemo disminuyen bajo las condiciones de deficiencia de Fe, como es el caso particular de la catalasa y peroxidasa. La enzima hemo desempeña un importante papel en asociación con el superóxido dismutasa (SD) (Kirkby y Römheld, 2008; Calderón, 2008; Broschat, 2009).

Tabla 1. Principales funciones y efectos de los micronutrientes esenciales para las Plantas

Micronutriente	Función (estructural, enzimática o metabólica) - Efecto
Fe, Mn, Cu	Constituyente de enzimas (metaloproteínas).
Mn, Zn	Activación de enzimas.
Fe, Cu, Mn, Cl	Involucrados en el transporte de electrones en la fotosíntesis. El Cl es requerido en reacciones fotosintéticas involucradas en la producción de oxígeno
Mn, Zn, Mo	Involucrados en la tolerancia al estrés.
Cu, Mn, Zn, B	Involucrados en el crecimiento reproductivo (inducción de la floración, polinización, establecimiento de fruto).
B, Zn	Constituyente de paredes y membranas celulares.
Ni	Ureasa, metabolismo del N, hidrólisis de la Urea, Favorece el crecimiento.

Fuente: (Kirkby y Römheld, 2008a; 2008b; 2008c; Castro y Gómez, 2010 adaptado de Ortega y Malavolta, 2012)

Las peroxidasa ligadas a la pared celular catalizan un segundo tipo de reacción, la polimerización de fenoles para la formación de lignina. La actividad de la peroxidasa se reduce apreciablemente en raíces deficientes en Fe y esta condición deriva en problemas en la formación de la pared celular y en la lignificación, situación que ocurre junto con la acumulación de sustancias fenólicas en la superficie de las raíces deficientes en Fe (Kirkby y Römheld, 2008).

La falta de Fe reduce la producción de ferredoxina, lo que a su vez afecta el transporte de electrones necesarios para estos procesos, incluyendo la reducción a nitrito y sulfito, por esta razón, tanto el nitrato como el sulfato se acumulan en plantas deficientes en Fe. (Marschner, 1995; Pilarte, 2013; Kirkby y Römheld, 2008)

La clorosis presente en plantas deficientes en Fe no es solamente una expresión del efecto del Fe en el desarrollo y función de los cloroplastos para la biosíntesis de clorofila. Las menores concentraciones de carbohidratos en plantas deficientes indican también una reducción de la actividad fotosintética. (Pilarte, 2013; Kirkby y Römheld, 2008)

Los primeros síntomas visibles de deficiencia de Fe aparecen como clorosis en las hojas jóvenes. En la mayoría de las especies, la clorosis aparece entre las nervaduras en un reticulado fino, sin embargo, las nervaduras permanecen verdes y contrasta con el fondo verde más claro o amarillento del resto del tejido. Las hojas más jóvenes pueden carecer completamente de clorofila (García, 2002; Goh y Härterd, 2012; Ferraris, 2013)

El intervalo de deficiencia está entre 50 a 100 mg.kg<sup>-1</sup> de Fe en la hoja, dependiendo de la especie y en ocasiones del cultivar. Sin embargo, las hojas de las plantas en las cuales las concentraciones de Fe son mayores pueden mostrar síntomas de deficiencia como consecuencia de la inhibición del crecimiento en la hoja (fenómeno Concentración-Dilución) (Kirkby y Römheld, 2008a)

#### *Manganeso (Mn)*

El Mn está presente en las plantas principalmente en forma divalente Mn (II). Esta forma de Mn se combina rápidamente con ligandos orgánicos, en los cuales puede ser rápidamente

oxidado a Mn (III) y Mn (IV). Además, el Mn desempeña un importante papel en los procesos redox, tales como en el transporte de electrones en la fotosíntesis y en la desintoxicación de radicales de oxígeno libres. El Mn forma metaloproteínas, que a su vez son componentes de solo dos enzimas, la enzima que quiebra la molécula de agua en la fotosíntesis II (FS II) y de la superóxido dismutasa que contienen Mn. También es el activador de varias enzimas (García, 2002; Ferraris, 2013)

Debido a la participación fundamental del Mn en la cadena de transporte de electrones durante la fotosíntesis, cuando se presenta la deficiencia de este micronutriente, la reacción a la luz durante la misma se perjudica seriamente, al igual que todas las otras reacciones asociadas al transporte de electrones (fotofosforilación y la reducción del CO<sub>2</sub>, nitrito y sulfito). El nitrito acumulado puede controlar la nitrato reductasa de modo que el nitrato se acumula como se observa algunas veces en plantas con deficiencia de Mn (Kirkby y Römheld, 2008; Pilarte, 2013).

La deficiencia de Mn se parece a la de Mg porque ambas aparecen como clorosis intervenal en las hojas. Sin embargo, a diferencia de la deficiencia de Mg que aparece en las hojas viejas, los síntomas de la deficiencia de Mn son inicialmente visibles en las hojas más jóvenes. Ella se manifiesta como pequeños puntos amarillentos en las hojas jóvenes en dicotiledóneas o como manchas o tiras gris verdosas en la parte basal de las hojas de las monocotiledóneas (Pilarte, 2013; García, 2002; Broschat, 2009)

Otras plantas que se han reportado como susceptibles incluyen a: paurotis (*Acoelorrhaphe wrightii*), dátil enano (*Phoenixroebelenii*), africana de aceite (*Elaeis guineensis*) y Latan (*Latan spp*). Estas palmas son altamente susceptibles y deben tratarse regularmente con aplicaciones (foliares o al suelo) o morirán. La deficiencia de Mn en el coco es transitoria y por lo tanto no es fatal (Garófalo *et al.*, 2003).

#### *Cobre (Cu)*

El Cu se parece en algo al Fe, debido que forma quelatos altamente estables que permiten la transferencia de electrones. Por esta razón, desempeñan un papel comparable

al del Fe en los procesos redox de la fisiología de la planta. Sin embargo, a diferencia de Fe, las enzimas que contienen Cu pueden reaccionar con oxígeno molecular y catalizan preferentemente procesos terminales de oxidación (Kirkby y Römheld, 2008).

Entre las causas de esterilidad masculina (en cuanto el polen no viable proveniente de plantas con deficiencia de cobre), se incluyen la falta de almidón en el polen y la inhibición de la liberación de estambres como resultado de problemas en la lignificación de las paredes celulares de las anteras.

En trigo, el efecto más marcado de la deficiencia de Cu es la reducción del crecimiento del sistema reproductivo, condición que luego se expresa en la producción de granos (García, 2002; Kirkby y Römheld, 2008).

Los síntomas típicos de la deficiencia de Cu son clorosis, necrosis, distrofia foliar y muerte descendente. Los síntomas generalmente aparecen en los tejidos de los brotes, lo que es un indicativo de la pobre distribución de Cu en plantas con deficiencia de este nutriente. Varias proteínas que contienen Cu desempeñan un papel fundamental en procesos tales como la fotosíntesis, respiración, desintoxicación de radicales superóxido y lignificación. Cuando se presenta una deficiencia de Cu, la actividad de estas enzimas se reduce drásticamente (García, 2002; Broschat, 2009; Ferraris, 2013). La Cu-Zn-SOD (superóxido dismutasa) está localizada en los estromas de los cloroplastos, sitio donde el átomo de Cu está directamente involucrado en la desintoxicación de O<sup>-</sup> generado durante la fotosíntesis. La actividad de las enzimas es mucho más baja cuando existe deficiencia de Cu (Kirkby y Römheld, 2008).

El papel del Cu en el metabolismo secundario puede ser más bien el agente que provoca la presencia de síntomas de deficiencia. Las enzimas polifenol oxidasa, ascorbato oxidasa y diamino oxidasa, que contienen Cu, aparecen en las paredes celulares y desempeñan un papel importante en la biosíntesis del fenol, vía quinona, a sustancias melanóticas y a lignina (López, 1998; García, 2002; Arias y Beltrán, 2010).

#### *Molibdeno (Mo)*

El Mo difiere del Fe, Mn y Cu, en el hecho de que está presente en las plantas como anión, principalmente en la forma más oxidada, Mo (VI), pero también como Mo (V) y Mo (IV). Además, diferente a todas las otras deficiencias de micronutrientes, la deficiencia de Mo está asociada con suelos muy ácidos (pH < 4). También es importante anotar que de todos los micronutrientes el Mo está presente en las plantas en menor concentración (<1 mg.kg<sup>-1</sup> de materia seca), sin embargo, eso es suficiente para suplir adecuadamente la planta (Marschner, 1995). Solamente algunas enzimas contienen Mo en las plantas superiores. Las dos más importantes e investigadas son la nitrato reductasa y la nitrogenasa, presente en las leguminosas noduladas. Las enzimas que contienen Mo se pueden describir como proteínas multicentro de transferencia de electrones (García, 2002; López, 1998; Castro y Gómez, 2010)

Las plantas con deficiencia de Mo muestran un aumento de compuestos solubles de N, como amidas, y la actividad de la ribonucleasa. En cuanto a las concentraciones de proteínas, se

reduce indicando que el Mo está envuelto en la síntesis de estos compuestos. Este papel en la síntesis de proteínas puede ser el responsable del efecto directo del Mo sobre la concentración de la clorofila, la estructura de los cloroplastos y el crecimiento (Kirkby y Römheld, 2008).

Los síntomas de deficiencia de Mo difieren entre especies vegetales, pero los más típicos son el punteado intervenal, la clorosis marginal de las hojas más viejas y enrollamiento hacia arriba de los márgenes de las hojas. A medida que la deficiencia progresa, aparecen manchas necróticas en las puntas y los márgenes de las hojas, las cuales se asocian con altas concentraciones de nitrato en el tejido. Quizá el ejemplo más conocido de esta deficiencia aparece en la coliflor, en la cual el tejido foliar no se forma adecuadamente y en casos extremos solamente se forman las nervaduras de las hojas (cola látigo) (Pilarte, 2013; García, 2002).

#### *Zinc (Zn)*

En contraste con el Fe, Mn, Cu y Mo, el Zn es un elemento de transición que no está sujeto a cambios de valencia y está presente en las plantas solamente con Zn (II). El elemento funciona principalmente como catión divalente en metaloenzimas, algunas de las cuales ligan las enzimas y sus correspondientes sustratos, mientras que, en otros casos, el Zn forma complejos tetrahídricos con el N y el O, y particularmente ligados de S en una variedad de compuestos orgánicos (Bonilla *et al.*, 1998; García, 2002)

La alteración del metabolismo de la auxina, particularmente del ácido indolacético (AIA), está estrechamente relacionada con los síntomas de deficiencia de Zn como crecimiento retardado y “hojas pequeñas”, es decir, inhibición en la elongación de los internodos y reducción del tamaño de la hoja. La forma cómo funciona el Zn en el metabolismo de las auxinas no está completamente clara; pero parece probable que el triptófano, el cual requiere de Zn para su formación, sea el precursor en la biosíntesis del AIA. De todas maneras, cuando se da la deficiencia de Zn, no solo existe menos AIA sintetizado, sino que éste se ve sujeto a una mayor degradación oxidativa (López, 1998; García, 2002; Pilarte, 2013)

La deficiencia de Zn está íntimamente relacionada con el metabolismo del N. Cuando se suprime el Zn, la concentración de proteínas disminuye y aumenta la de los aminoácidos. Al volver a proveer el Zn, rápidamente se induce la síntesis de proteínas. Este efecto de la deficiencia de Zn al inhibir la síntesis de proteínas es principalmente el resultado de la disminución del ácido ribonucleico (ARN). Esto último es atribuido a la actividad más baja de la Zn polimerasa, a una menor integridad estructural de los ribosomas y a una mayor degradación del ARN (López, 1998; García, 2002; Kirkby y Römheld, 2008).

La isoenzima superóxido dismutasa (SOD o Cu-Zn-SOD), la cual contiene Zn, desempeña un importante papel en la remoción de los radicales superoxidados (O<sup>-</sup>), y por lo tanto en la protección de las membranas y las proteínas contra la oxidación. El Zn controla la generación de radicales tóxicos de oxígeno al interferir en la oxidación de NADPH, como también en la remoción de radicales de O<sub>2</sub> por su rol en la

enzima Cu-Zn-SOD (Alloway, 2007; Calderón, 2008; Kirkby y Römheld, 2008).

Al sufrir una deficiencia de Zn, la generación de O<sup>2-</sup> aumenta y se produce un aumento típico de la permeabilidad de la membrana plasmática a medida que los radicales tóxicos de O<sub>2</sub> libres rompen los dobles enlaces de los ácidos grasos poliinsaturados y los fosfolípidos de las membranas. Esto lleva a una pérdida de azúcares, aminoácidos y potasio (K). El aumento de la oxidación de lípidos en las hojas lleva a la destrucción de la clorofila, necrosis y crecimiento atrofiado producto de la oxidación del AIA, particularmente bajo una alta intensidad luminosa (Marschner, 1995; Kirkby y Römheld, 2008).

Existen cada vez más evidencias de que el Zn, ayuda a mantener la estructura e integridad de la membrana y el control de la permeabilidad; también protege la planta contra varios agentes patógenos. En plantas con deficiencia de este micronutriente, las membranas pierden sus características de permeabilidad de tal modo que los carbohidratos y los aminoácidos son liberados, atrayendo agentes patógenos e insectos tanto hacia las raíces y nuevos brotes. Las concentraciones críticas típicas para deficiencia de Zn en los tejidos se encuentran entre 15 mg.kg<sup>-1</sup> y 30 mg.kg<sup>-1</sup> y pueden ser mayores en plantas con alto contenido de P (García, 2002; Goh y Härdter, 2012).

El Zn también es requerido para el crecimiento generativo y la viabilidad del polen es altamente dependiente de un adecuado suplemento de este nutriente (Alloway, 2007).

#### *Boro (B)*

El B es el menos entendido de todos los nutrientes, a pesar de que, en términos molares, las dicotiledóneas lo requieren en mayores cantidades que otros micronutrientes. Parece que no es requerido por hongos o bacterias y no existe evidencia que sea un activador o un constituyente de alguna enzima. La deficiencia de B es relativamente fácil de inducir y los síntomas aparecen rápidamente junto con los cambios peculiares en la actividad metabólica (Arias y Beltrán; 2010). Estos cambios se han investigado a través de los años y las funciones en las que se piensa que participa el B incluyen el transporte de azúcares, lignificación de la pared celular, estructura de la pared celular, metabolismo de los carbohidratos, metabolismo del ARN, respiración, metabolismo del AIA, metabolismo de los fenoles, función de la membrana, fijación de N<sub>2</sub>, metabolismo de ascorbato y disminución de la toxicidad del Al (Bonilla *et al.*, 1998; García, 1998; López, 1998; García, 2002; Kirkby y Römheld, 2008).

La intervención del B en la germinación del polen y en el crecimiento del tubo polínico son particularmente importantes para la producción de los cultivos. Ambos procesos se inhiben severamente cuando existe deficiencia de B. Son necesarias altas concentraciones de B para promover el crecimiento del tubo polínico en el estigma y en el estilo, esto se logra por la desactivación fisiológica de la calosa mediante la formación de borato de calosa en la interfase del tubo polínico con el estilo (López, 1998; García, 2002; Kirkby y Römheld, 2008; Arias y Beltrán; 2010).

Según revisión de Ortega y Malavolta (2012) al parecer el B actúa por medio de alteraciones del metabolismo de los fenoles, específicamente en el reconocimiento del huésped en el establecimiento de la simbiosis.

El B participa de una serie de procesos fisiológicos dentro de la planta y en ocasiones su deficiencia se confunde con la de otros nutrientes como la de P y K. Entre las funciones del B en las plantas, dos están muy bien definidas: la síntesis de la pared celular y la integridad de las membranas plasmáticas. Por esta razón, en presencia de una deficiencia de B no crecen nuevas raíces y tampoco nuevas brotaciones. La adsorción de B se incrementa con el contenido de arcilla y con el pH del suelo. Aparentemente las dosis de B actualmente recomendadas no logran mantener la concentración adecuada de B en la solución del suelo para el óptimo desarrollo de las plantas, particularmente en suelos arcillosos y con exceso de encalado (Yamada, 2000; Brown, 2007).

Las especies de plantas varían en sus requerimientos de B. Las plantas productoras de látex, como la amapola (*Papaver*) y el diente de león (*Taraxacum*), presentan valores de 80-100 mg kg<sup>-1</sup>; las dicotiledóneas de 20-70 m.kg<sup>-1</sup> y las monocotiledóneas de 5-10 mg.kg<sup>-1</sup>. Estas variaciones probablemente se relacionan con las diferencias en la composición de la pared celular. En muchos cultivos donde la movilidad de B dentro de la planta es baja, las hojas jóvenes y los brotes terminales muestran un crecimiento retardado o necrosis. Los internudos son más cortos y las láminas foliares se deforman: el diámetro de los tallos y peciolo se incrementa y esto puede llevar a la quebradura del tallo, como sucede en el apio (Bonilla *et al.*, 1998; Kirkby y Römheld, 2008) o las hojas de la palma de aceite, así como, necrosis de la inflorescencia y caída prematura del fruto (Broschat, 2009).

Los cultivos difieren en su tolerancia al exceso de boro. Algunos pueden presentar una tolerancia muy baja al mismo, aunque pueden sufrir por deficiencia en condiciones extremas especialmente los cítricos, leguminosas de grano, trigo, cebada y avena (García, 1998).

La toxicidad se puede presentar cuando se usan aguas de riego altas en boro (1-10 mg/L), para especies susceptibles y tolerantes. Los síntomas típicos en hojas maduras son clorosis o necrosis o ambas en los márgenes y los ápices. El patrón de clorosis y necrosis sigue en las venas de las hojas. En las monocotiledóneas se presenta necrosis en los ápices, mientras que en las dicotiledóneas la necrosis es apical y marginal. La toxicidad puede ser inducida por una aplicación excesiva pero no es frecuente observar una reducción marcada de los rendimientos como respuesta a una toxicidad ligera o moderada (Bonilla *et al.*, 1998; García, 1998).

En experimento realizado en Barrancabermeja (Colombia), Arias y Munévar (2006) encontraron toxicidad inducida por B, con dosis iguales o superiores a 0,5 g/palma/quincenal de Borato, lo cual indica un margen estrecho entre la suficiencia y la toxicidad de la palma en fase de vivero, ya que causaron necrosis y detección del crecimiento. Los mayores niveles de daño se asociaron a concentraciones de B en la hoja No 3

superiores a 11 ppm, nivel sugerido como referencia para futuros trabajos.

#### *Cloro (Cl)*

El Cl es un nutriente excepcional en las plantas. Por ser generalmente requerido en muy bajas concentraciones puede clasificarse como un micronutriente, pero es común que se presente en los tejidos de las plantas en concentraciones mucho mayores, semejantes a las que normalmente serían asociadas con los macronutrientes (Goh y Härdter, 2012). A pesar de las altas concentraciones de Cl en el tejido de casi todas las plantas, el requerimiento para el crecimiento óptimo de la mayoría es mucho más bajo (100-200 mg.kg<sup>-1</sup>) (Kirkby y Römheld, 2008).

La intervención como cofactor para activar el fraccionamiento de la molécula del agua en el fotosistema II (FS II) es la función más conocida del Cl. (Marschner, 1995; López, 1998; Kirkby y Römheld, 2008; Arias y Beltrán, 2010).

El Cl puede afectar el crecimiento de las plantas indirectamente por intermedio de la regulación estomatal, como ión contrario del K<sup>+</sup>. La acción del Cl, en lugar de malato, es de particular importancia para las plantas en las cuales los cloroplastos de las células guardianes de los estomas no están presentes, o tienen desarrollo incipiente, como la cebolla o el coco. En estas especies, la inhibición del crecimiento por deficiencia de Cl parece ser causada por una disminución del control del cierre estomatal durante el estrés por sequía (Kirkby y Römheld, 2008; Arias y Beltrán, 2010). Las plantas de kiwi también presentan requerimientos muy altos de Cl, que parecen estar relacionados con el uso preferencial de este micronutriente en lugar de aniones orgánicos para el balance de las cargas. El papel del Cl en el balance de cargas es probablemente la razón de la respuesta de estas especies a aplicación de este micronutriente. Otros efectos del Cl que promueven el crecimiento de la planta pueden proceder de la acción del Cl en la supresión de enfermedades, como la mancha gris en las hojas de palma, el mal del pie en el trigo (Marschner, 1995; Kirkby y Römheld, 2008; Goh y Härdter, 2012).

Todavía no está claro el papel del Cl en el metabolismo del N y la síntesis de proteínas, pero se ha demostrado que en el tejido vegetal deficiente en Cl, se acumulan aminoácidos (Goh y Härdter, 2012).

Los síntomas típicos de deficiencia de Cl incluyen la caída de las hojas, enrollamiento de los folíolos, marchitez, bronceamiento y clorosis similares a la deficiencia de Mn y severa inhibición del crecimiento radicular (Broschat, 2009; Pilarte, 2013).

#### *Níquel (Ni)*

Hasta hace muy poco solamente se consideraban los efectos tóxicos del Ni en la nutrición de las plantas. Existió especial interés por entender por qué ciertas especies de plantas eran capaces de tolerar las altas concentraciones de Ni presentes en suelos de serpentina (García, 2002; Ortega y Malavolta, 2012).

En plantas de soya con bajo contenido de Ni, dependientes de la fijación de N<sub>2</sub> o abastecidas con NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, se

encontraron concentraciones extremadamente altas de urea en la punta de las hojas, situación que se evitó con la aplicación de Ni. A partir de este y otros experimentos similares, fue posible concluir que el Ni es un elemento esencial, puesto que se demostró su función en la actividad de la ureasa (Ortega y Malavolta, 2012)

La deficiencia de Ni en plantas cultivadas en el campo solamente se ha reportado una sola vez en árboles de nuez pecano en el sureste de los Estados Unidos. Los árboles presentaron hojas pequeñas en forma de “oreja de ratón”.

La toxicidad de níquel puede ser un problema difícil en suelos derivados de rocas ultrabásicas o de serpentina. Las palmas afectadas por toxicidad de níquel pueden mostrar patrones cloróticos estrechos, a manera de red de pescar en las hojas más jóvenes, además el crecimiento puede retardarse gravemente. No se recomienda plantar palma de aceite en este tipo de suelos (Goh y Härdter, 2012), aunque se pueden neutralizar sus efectos elevando el pH (encalado) y adicionando materia orgánica, la cual tiene capacidad de formar complejos orgánicos insolubles con él microelemento (García, 2002).

#### **Nutrición mineral de las plantas**

##### *Factores-Procesos- Disponibilidad*

La nutrición es el proceso fisiológico de absorción, transporte y utilización de asimilados por los cultivos involucrando elementos denominados nutrientes, los cuales son exclusivamente de origen mineral (Castro y Gómez, 2010)

La fertilidad del suelo se refiere a la capacidad de aporte de agua y nutrientes esenciales que se encuentra interactuando entre la fase coloidal y la fase soluble. De este modo, se conserva la fertilidad del suelo cuando la salida de elementos nutritivos es compensada por la entrada de estos al sistema; por lo tanto, si las exportaciones son mayores a las aportaciones, la fertilidad del suelo disminuye (Castro, y Gómez, 2010)

Entender la dinámica nutricional a través de la relación suelo-planta-ambiente constituye el punto de partida para lograr un manejo eficiente de nutrientes, que responda a las verdaderas necesidades nutricionales de los cultivos (Arias y Munévar, 2004).

Asimismo, conocer los procesos que inciden en la disponibilidad de cada nutriente permite un mejor diagnóstico y manejo de la eficiencia del elemento el suelo. Entre más procesos de pérdida se identifiquen, menor es la capacidad productiva de un suelo, menos eficiente es la movilidad y absorción del nutriente y mayor es el costo para el manejo de la fertilidad (Riascos, 2002; Microfertisa, 2012).

##### *Movilidad y absorción de nutrientes*

Los elementos nutrientes pueden ser absorbidos por la planta a nivel edáfico y/o foliar de diferentes formas. Su grado de movilidad en la interacción suelo-planta está determinado principalmente por formas iónicas y moleculares que dependen del peso atómico, la valencia y el tipo de movimiento en el suelo (Tabla 2).

La movilidad de nutrientes en la relación suelo planta está determinada por:

- Movimiento de iones desde la superficie de los coloides hacia la superficie de la raíz por procesos de transporte (difusión, flujo de masa e intercepción radical)
  - Movimiento de iones de la superficie de la raíz al apoplasto de la raíz (espacios intercelulares- xilema) mediante flujo pasivo (difusión) y posterior descarga de nutriente al floema de la célula (simplasto), mediante flujo activo (bombas de ATP, proteínas de transferencia).
  - Movimiento de traslocación de iones desde el interior de la raíz a otros órganos de la planta vía xilema-floema (presión radical, difusión, corriente traspiratoria).
- El movimiento por flujo de masa depende del diferencial del contenido de humedad entre el suelo y la planta, así como de

la conductividad hidráulica del suelo (caso de los iones de  $N > Mg > Cl > Ca > B$ ).

El movimiento por difusión se da por diferencia de concentraciones de nutrientes entre la superficie de la raíz y la disolución acuosa del medio (caso de los iones de  $P > K > Mn > Zn > Fe > B > Cl$ ).

En la intercepción radical se refiere al volumen del suelo desplazado (explorado) por la raíz y depende de oxigenación de la rizósfera, concentración y balance nutricional, proceso el cual puede ocurrir para la mayoría de los elementos ( $Cu > Fe > Zn > Ca$ ).

Tabla 2. Micronutrientes esenciales y características prácticas aplicables a su manejo

Elemento	Forma de absorción	Peso atómico	Movilidad		Tipo de movilidad en el suelo (%)		
			Suelo	Planta	Flujo demasa	Intercepción radical	Difusión
Mn	$Mn^{++}$ , quelato	54,9	Móvil	Poco móvil	5	15	80
Zn	$Zn^{++}$ , quelato	65,4	Poco móvil	Poco móvil	30	30	40
Cu	$Cu^{++}$ , quelato	63,5	Poco móvil	Poco móvil	20	70	10
Fe	$Fe^{++}$ , $Fe^{+++}$ , quelato	55,8	Móvil	Poco móvil	10	50	40
B	$H_3BO_3$ , $H_2BO_3$ , $HBO_3$ , $BO_3$	10,8	Móvil	Inmóvil	65	3	32
Mo	$MoO_4$ , $HMoO_4$	95,9	Poco móvil	Móvil	95	5	0
Cl	$Cl^-$	35,4	Móvil	Móvil	75-80	1-2	15-20
Ni	$Ni^{+2}$	58,7	Poco móvil	Poco móvil	0	X	X

(adaptado de Castro y Gómez, 2010).

#### Factores del suelo y disponibilidad de nutrientes

El suelo se define como un complejo órgano-mineral compuesto en general por las fases sólida, líquida, gaseosa y coloidal. Dichas fases interactúan mediante procesos físicos, químicos y biológicos, así como, el manejo agronómico, que condicionan la fertilidad natural del suelo y a su vez la producción de los cultivos.

La concentración de nutrientes en la fase soluble es muy baja (por flujo de entradas y salidas muy dinámico). Cuando la planta disminuye los nutrientes de la solución del suelo, los que están retenidos en los coloides (arcillas y humus) pasan a la solución para conservar el equilibrio y lograr acercar los nutrientes a la zona de raíces (Marschner, 1995).

La fase cambiante o coloidal define el factor cantidad, es decir la reserva iónica susceptible de intercambio a la solución del suelo. Por su parte, la dinámica (velocidad) de transferencia de iones de la fase cambiante a la solución del suelo define el llamado factor intensidad. La relación cantidad

/intensidad se toma como factor capacidad, término que valora la verdadera disponibilidad de un determinado nutriente (Lora, 1998; Castro y Gómez, 2010).

#### Material Parental y la mineralogía en el aporte de nutrientes

La naturaleza de la fracción cambiante, dependiente a su vez de la fase sólida, constituida por partículas minerales de la fracción arena y la fracción arcilla (relación roca-mineral-elementos nutrientes) más sólidos orgánicos y/o humus,

provenientes de tejidos animales y vegetales frescos, define la disponibilidad de nutrientes para la planta y su grado de fijación a la superficie de los minerales del suelo (Figura 1).

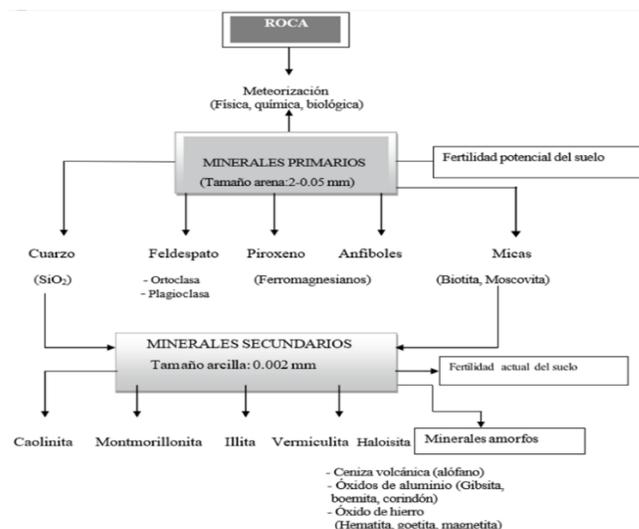


Figura 1. Resumen de la transformación de la roca (sustrato geológico basal) a minerales primarios y secundarios como indicadores cualitativos de la fertilidad potencial y actual del suelo (Castro y Gómez, 2010)

El origen de los materiales influye en la disponibilidad de los nutrientes, ya que si el material parental no los contiene es imposible que los pueda aportar. Las areniscas son bajas en bases, P y micronutrientes, y altas en Al y Fe (Owen, 1995; Arias y Munévar, 2004). Asimismo, la presencia de Fe, Mn, Zn, Cu, Ni y Co está directamente relacionada con la presencia de minerales ferromagnesianos y suelos arcillosos (Miranda *et al.*, 2011).

Según Castro y Gómez (2010), la interpretación de la fertilidad está influenciada por el grado de evolución de los suelos. En suelos jóvenes (Entisoles, Vertisoles e Inceptisoles), la fertilidad actual es función de los minerales arcillosos predominantes (montmorillonita, illita de carga permanente) y de los aportes de materia orgánica. En contraste, la fertilidad actual de los suelos viejos (Alfisolos, Ultisoles, Oxisoles), de alto grado de meteorización y pérdidas generalizadas de elementos nutritivos depende en buena parte de la fase orgánica para mantener las características de suelo fértil.

Lo anterior se corrobora, ya que en los estudios de suelos palmeros predominan las arcillas tipo caolinita y gibsitita de menor CIC que la motmorillonita. Así, en los suelos del Departamento del Meta, Muñoz y Owen (1985) determinaron que la materia orgánica contribuye con el 85% de la CIC y la arcilla únicamente con el 15%. Esto muestra la importancia de conservar y aumentar la materia orgánica, lo cual se logra con una buena cobertura de leguminosas rastreras correctamente inoculadas y fertilizadas, haciendo paleras con las hojas podadas y con el retorno de los racimos vacíos (raquis) al campo (Owen, 1995; González, 2002).

#### *Procesos físicos en el manejo de nutrientes*

El concepto de fertilidad física se refiere a la oferta edafológica que el suelo debe brindar a las raíces de las plantas para que éstas logren un crecimiento vigoroso y rápido, asegurando la extracción adecuada de agua y nutrientes para que los cultivos puedan maximizar sus rendimientos (Amézquita, y Rubiano, 2002; Valenzuela y Torrente, 2010).

La fertilidad física puede ser natural o inducida mediante sistemas adecuados de manejo, especialmente los relacionados con labranza, riego, drenaje y control de salinidad (Zakaria, 1998; Kiang y Goh, 2007).

El suelo debe tener una porosidad total de por lo menos un 50%, con una buena distribución de macro, meso y microporos, para facilitar el movimiento de agua y aire. Así, suelos de textura fina presentan mayores posibilidades de contacto con las raíces más finas y también mayor interacción con los agentes de alteración que promueven la liberación de nutrientes asimilables con menos posibilidad de pérdidas; caso contrario con suelos de texturas gruesas, con mayor tendencia a la compactación (Valenzuela y Torrente, 2010; Castro y Gómez, 2010).

El factor limitante en la producción es la falta de oxígeno y no el exceso de agua, porque las plantas superiores y los microorganismos del suelo consumen el oxígeno y producen gas carbónico (CO<sub>2</sub>) en la respiración aeróbica. Para que las reacciones biológicas se realicen en su máxima expresión, la

mayoría de las plantas superiores requieren de un nivel óptimo de oxígeno y un nivel bajo de CO<sub>2</sub>. Si el nivel de oxígeno no es el adecuado, las raíces no se desarrollan correctamente, se reduce el crecimiento, la absorción de agua y nutrientes y, consecuentemente, la producción (Owen, 1995).

En ensayos realizados por Cristancho *et al.* (2007) se encontró que la densidad radical correlacionó negativamente con la densidad aparente. Se destaca también, que en suelos con densidades aparentes mayores de 1,7 g.cm<sup>-3</sup> no se encontraron raíces. Asimismo, la raíz de la palma de aceite es altamente sensible a la interacción de parámetros físicos y químicos; por ende, resulta indispensable realizar una adecuada labranza y corregir con enmiendas el exceso de Al, con lo cual se puede lograr un desarrollo radical adecuado.

#### *Procesos químicos y manejo de nutrientes. Implicaciones del complejo de cambio*

La capacidad de intercambio catiónico son las cargas eléctricas negativas de los coloides del suelo formados por la materia orgánica y las arcillas.

La CIC es sumamente importante porque determina la capacidad buffer del suelo y la retención de los cationes (cargas eléctricas positivas), reduciendo la lixiviación de ellos; además permite inferir propiedades relacionadas con la riqueza de los coloides del suelo, acidez, tipo de material parental, requerimientos de enmiendas, fertilización lo cual en conjunto es un índice que expresa la capacidad productiva de un suelo (Owen, 1992; Castro y Gómez, 2010).

Los procesos de intercambio catiónico influyen relativamente poco, en forma directa, en la disponibilidad de micronutrientes. Esto es debido a que involucra especies químicas como Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Al<sup>3+</sup> y NH<sup>+</sup> que se encuentran en el suelo en concentraciones de varios órdenes de magnitud superiores a los micronutrientes. Sin embargo, el Zn (y en menor proporción el Cu) son retenidos por las arcillas silicatadas en sitios de adsorción específicos. Esto se explica, dado que los óxidos e hidróxidos de Fe y Mn poseen cargas variables, entonces el alcance de la retención depende del pH edáfico, siendo menor a mayor grado de cristalización de los óxidos (Ferraris, 2013).

Los cationes son adsorbidos con diferente intensidad en el coloide, por ello se establece la siguiente energía de retención (Marschner, 1995; Castro y Gómez, 2010): Al<sup>3+</sup>>Fe<sup>+3</sup>>Ca<sup>+3</sup>>K<sup>+</sup>>NH<sub>4</sub><sup>+</sup> para suelos desaturados y Ca<sup>+2</sup>>Mg<sup>+2</sup>>K<sup>+</sup>Na<sup>+</sup>>NH<sub>4</sub><sup>+</sup> para suelos saturados.

Cuanto mayor sea la valencia del catión, mayor será su poder de adsorción, siendo mayor para los divalentes que para los monovalentes.

Si los cationes presentan la misma valencia se fijan con más intensidad aquellos con menor radio de hidratación, por eso el potasio que aumenta su radio dos veces cuando se hidrata, se adsorbe más fuertemente que el sodio, que ve aumentado su radio iónico cuatro veces al hidratarse (Marschner, 1995).

En el caso de los iones metálicos las propiedades de retención en el suelo dependen en alto grado de la materia orgánica y de la formación de complejos organometálicos (Burbano, 1998; Ferraris, 2013). Cuando domina el Al<sup>+3</sup> o Fe<sup>+3</sup> en

suelos con alto contenido de materia orgánica, se limita la disponibilidad de otros micronutrientes como Cu, Mn y Zn según la siguiente ecuación:  $Al^{+3} > Fe^{+3, +2} > Cu^{+2} > Mn^{+2} > Zn^{+2}$

#### *Condiciones redox*

En suelos bien aireados donde el potencial redox es alto, el oxígeno es un aceptor final de electrones. Cuando se presenta déficit de oxígeno muchos microorganismos utilizan compuestos que actúan como aceptores secundarios de electrones, como el nitrato, manganeso, hierro, sulfato y en ocasiones el dióxido de carbono, para mantener sus procesos metabólicos. Esta situación puede manifestarse en suelos inundados, en el interior de macroagregados o como resultado de la incorporación de un gran volumen de residuos orgánicos, que origina un incremento de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera edáfica (Castro y Gómez, 2010; Ferraris, 2013).

En Papúa Nueva Guinea, los racimos desfrutados aplicados a 120 t.ha<sup>-1</sup> causaron condiciones anaeróbicas en el suelo que afectaron adversamente a la producción de racimos de frutos. Por ello, no se recomienda tasas de aplicación mayores a 80 t.ha<sup>-1</sup>, pues pueden perjudicar el comportamiento de la palma en áreas con alta precipitación. Como beneficios se tienen el mejor crecimiento y periodo improductivo reducido en palmas jóvenes (Redshaw, 2012).

En condiciones aeróbicas, el Fe(III) se encuentra principalmente precipitado como óxidos, y en menor proporción como fosfatos y otras sales inorgánicas. En condiciones reductoras, el Fe(II) es soluble y pasa a ser móvil en los suelos por lo que puede producirse un efecto tóxico de este elemento. La solubilidad del Mn también se incrementa en condiciones reductoras, debido a su reducción a Mn (II) y puede alcanzar concentraciones que resultan tóxicas para las plantas con limitantes severos en la absorción del hierro (Castro y Gómez, 2010; Ferraris, 2013).

Por otra parte, el ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) es un inhibidor de la respiración celular, y otros compuestos orgánicos que pueden formarse, como el ácido acético o el ácido butírico, también son tóxicos si se acumulan en las proximidades de la raíz. Asimismo, el CO<sub>2</sub> en medios reducidos pasa a metano CH<sub>4</sub> (Calderón, 2008).

También, se ha observado que la disponibilidad de Cu y Zn disminuye bajo condiciones reductoras, a pesar de que estos elementos no presentan equilibrios de óxido-reducción. Ocurre que la reducción de óxidos de Fe y Mn origina superficies amorfas con elevada capacidad de adsorción y sobre estas superficies se verifica una elevada tasa de adsorción de Cu y Zn (Owen, 1995; Ferraris, 2013)

#### *Reacción del suelo (pH)*

Esta propiedad química afecta muchos procesos físicos, biológicos y de disponibilidad de nutrientes. De este modo, la precipitación del hierro, manganeso y cobre se da en medios alcalinos (alto pH); la precipitación del fósforo en suelos ácidos ricos en hierro y aluminio, o en suelos básicos con el calcio. En suelos de clima cálido y básicos (calcáreos), pueden producirse pérdidas por volatilización de nitrógeno en forma amoniacal:  $NH_4^+ + OH^- \text{ produce } NH_4^+ + HO$

(Cristancho *et al.*, 2011; Ferraris, 2013; Castro y Gómez, 2010).

El efecto dañino de la alta alcalinidad es generalmente debido a la alta alcalinidad en sí, en lugar de los iones hidróxidos. La dificultad de absorber Fe, Mn, B, Zn, Cu y fósforo no es por la incapacidad de la raíz de absorberlas, sino que estos nutrientes están en formas tan insolubles que las raíces no disponen de las cantidades requeridas por la planta. La raíz no puede absorber P a un pH 9 (Owen, 1992 y 1995; García, 2002).

La actividad de los microorganismos puede quedar inhibida en condiciones determinadas de pH. Así, la nitrificación se merma significativamente en condiciones de extrema acidez (pH < de 4,5) o alcalinos (pH > de 8) con lo que se limita la absorción del nitrógeno y el proceso de mineralización de otros elementos como fósforo y azufre (Owen, 1995).

En el caso de la alta acidez, el daño por el bajo pH es debido a efectos secundarios, con excepción de casos extremos, ya que las raíces de las plantas son heridas en una solución ácida de pH 3 (Castro y Gómez, 2010). Los efectos secundarios de la alta acidez en los suelos son los bajos contenidos disponibles de Ca, Mg y K, fosfatos y molibdatos, y el exceso de Al, Mn y Fe soluble; además, puede afectar la resistencia o susceptibilidad de las plantas a una enfermedad y restringe la población microbiana (Owen, 1995; González, 2002).

En Brasil, Souza *et al.* (2010), encontraron que la acumulación de B, Cu, Fe, Mn y Zn en la parte aérea de plantas de soya, inoculadas con *Bradyrhizobium japonicum* aumentó significativamente como consecuencia de la acidificación de la rizósfera, principalmente después de la nodulación.

#### *Salinidad*

Los suelos salinos se desarrollan en aquellas regiones en donde las lluvias son insuficientes para compensar las pérdidas de agua causadas por la evapotranspiración acompañadas de un bajo régimen de lavado. Un balance de sales favorable ocurre cuando la cantidad de sales que entran en la zona de raíces es menor o igual a la cantidad que sale en el agua de drenaje (García, 2002).

Los suelos con conductividad eléctrica (CE) en un extracto de suelo saturado > 4 dS.m<sup>-1</sup>, se clasifican como salinos. La palma de aceite no tolera la salinidad, y los suelos, con condiciones salinas en los primeros 50 cm de profundidad, se consideran no aptos para la palma de aceite. Donde la precipitación es adecuada, la salinidad del suelo puede ser corregida por el drenaje y bancales instalados para prevenir la entrada de agua de mar. Sin embargo, en muchas áreas costeras de Malasia, altas mareas excepcionales han permitido el paso del agua marina por encima de los bancales, y las plantas afectadas presentan quemaduras y crecimiento retardado por 2 a 3 años (Paramanathan, 2012)

En algunas zonas del Valle del Cauca en Colombia (suelos alcalinos), la respuesta a la aplicación de elementos menores depende de la fuente usada. Cuando se utilizan sulfatos, al suelo, generalmente no se observan efectos positivos por lo cual se recurre a la fertilización foliar y al uso de quelatos. Al contrario de lo que sucede en el Valle del Cauca, en otras

regiones del mundo los suelos calcáreos que tienen valores de pH alrededor de 8,0 se caracterizan por su respuesta positiva a la aplicación Zn; en muchos de ellos éste juega un papel determinante en la tolerancia de los cultivos al Na (García, 2002). En general, puede concluirse que en muchos casos la fertilización puede incrementar el estrés salino y cuando se tienen niveles de deficiencia los efectos de salinidad no son mermados por la fertilización (García, 2002).

#### *Interacciones iónicas*

Todos los elementos minerales obran entre sí y actúan sobre los otros, provocando sinergismos y antagonismos por efecto de la competencia iónica o la interacción en procesos de precipitación. Por ejemplo, los altos niveles de fósforo en el suelo o en la hoja competirán con el magnesio, hierro, zinc y cobre en asimilación (Kirkby y Römheld, 2008; Castro y Gómez, 2010).

El antagonismo se presenta cuando el aumento en la concentración de un elemento reduce la absorción de otro. Ejemplos en Micronutrientes:  $\text{NO}_3^-$ - $\text{Cl}^-$ , Fe-Mn, Na-Ca. Cuando los iones fijados al complejo de cambio coloidal guardan una adecuada proporción, estos antagonismos no suelen presentarse (Marschner, 1995); mientras que el sinergismo se presenta cuando el aumento en la concentración de un elemento favorece la absorción de otro. Ejemplos con micronutrientes: P-Mo, K-Mn (en planta), Ca-Cl (Escobar, 2007), Mg-B.

Puede darse el caso de existir antagonismo y sinergismo, como el caso de B-P (en planta) (Ortega y Malavolta, 2012); o sinergismo negativo, donde la carencia de un determinado elemento propicia la deficiencia de otro, caso de Ca-B (en suelo) (Castro y Gómez, 2010): un déficit de boro dificulta la absorción de calcio y viceversa, si bien es cierto que ante un exceso de uno de ellos se comportan como elementos antagónicos, dificultándose la normal absorción del otro (Ferraris, 2013).

#### *Procesos biológicos*

El componente biorgánico tiene repercusión directa en la fertilidad del suelo, de dos vías. Una relacionada con, los residuos frescos y en descomposición que se acumulan en la superficie del suelo y lo protegen de la erosión y de la pérdida excesiva de agua. El otro, asociado a los beneficios de la descomposición de los residuos animales y vegetales que aportan nutrientes por procesos de mineralización, óxido-reducción y solubilización, que finalmente terminan acumulándose en el suelo (Zakaria, 1998; Kiang y Goh, 2007; Ferraris, 2013).

En el manejo y sostenibilidad de la productividad del suelo en el tiempo debe existir un equilibrio entre acumulación de materia orgánica (humificación) y mineralización (paso de formas orgánicas a minerales disponibles) promovido mediante la actividad bioquímica de ciclaje (Burbano, 1998). Lo anterior se logra con acumulación de biomasa e incorporación de residuos, alternativa que depende de un manejo integral de la fertilidad y uso eficiente de nutrientes y fertilizantes, así como, optimizando la descomposición de la materia orgánica, buscando que los cultivos se beneficien de este proceso, lo cual se consigue con la rotación de cultivos

de menor producción de biomasa que aprovechen los productos de mineralización. Los nutrientes más asociados a la materia orgánica y actividad biológica son N>S>P>Cu>Mn (Castro y Gómez, 2010).

En cuanto a los cationes metálicos, los procesos biológicos y ciclaje de elementos que afecta la materia orgánica son: óxido-reducción (Fe, Mn), Solubilización (B, K), complejación y quelatación (Cu>Mn>Zn), cuya importancia tiene que ver con la solubilidad, toxicidad y fijación de nutrientes en el suelo (Burbano, 1998; Castro y Gómez, 2010)

Otro efecto importante de la materia orgánica tiene que ver con el incremento en la producción de raíces. Boniche *et al.* (2007), trabajando con Chontaduro (*Bactris gasipaes* K.) encontraron que las plantas tratadas con el fertilizante orgánico mostraron 3,97 y 1,46 veces la densidad de raíces finas, y 2,83 y 1,60 veces la densidad de raíces gruesas, de aquellas plantas tratadas con fertilizante químico y químico-orgánico, respectivamente.

#### *Factores del cultivo*

El proceso de absorción de nutrientes ocurre mediante inversión de energía metabólica y por tanto depende del estado fenológico del cultivo y del nutriente en particular. Las plantas jóvenes absorben más rápida e intensamente los elementos minerales, para ir disminuyendo esta absorción paulatinamente conforme avanza el desarrollo de la planta. El requerimiento está relacionado con la función fisiológica del elemento y la etapa del cultivo (Munévar, 2008; Múnevar, 2011; Forero, 2011; Inpofos, 2013).

La respuesta a la aplicación de nutrientes depende de condiciones muy particulares de la planta relacionadas con la absorción y la curva de exportación de nutrimentos a las diferentes secciones de la planta, aspecto clave para tener en cuenta en el diseño de planes de fertilización (Munévar, 2001; Sáenz, 2006)

#### *Factores ambientales y disponibilidad de nutrientes*

Los factores más relevantes sobre las plantas son la luz, la temperatura, la humedad y agua atmosférica. Con el incremento en la iluminación también aumentan las reservas carbonatadas y de la transpiración, por lo tanto, la absorción mineral tiende a intensificarse (efecto indirecto). En el caso de la asimilación del N, hay una interacción clara entre la luz y la nutrición mineral como la expresión de genes que codifican para la enzima nitrato reductasa y su actividad, la cual depende de la concentración de nitratos, niveles de luz y de carbohidrato; mientras que los compuestos de nitrógeno reducido inhiben el proceso que induce la transcripción de los genes que codifican para la nitrito reductasa (nitrito a amonio) (Calderón, 2008).

En cuanto a la temperatura, se destaca los efectos que ejerce el calor sobre la reducción de la tasa respiratoria y la fotosintética. Aunque la fotosíntesis es más sensible que la respiración. Cuando se supera el punto de compensación de la temperatura ( $\text{CO}_2$  fijado igual al  $\text{CO}_2$  producto de la respiración), se produce el consumo de reservas de la planta lo que se traduce en pérdida de dulzor (azúcares) de frutos y hortalizas (Calderón, 2008).

Las altas temperaturas modifican la composición y la estructura de la membrana celular y pueden causar la salida de iones de la célula y afectan todos los procesos que dependen de la funcionalidad de estas (Castro y Gómez, 2010). Asimismo, al aumentar la temperatura, se incrementan las concentraciones de P, Zn y K en los tejidos (Frye, 2002).

De otro lado, la absorción mineral se incrementa al aumentar, dentro de ciertos límites, la humedad del suelo (caso del N, P, S, B y Cu) (Frye, 2002) y Mn (Dávila *et al.*, 2000). El agua es necesaria para la producción de azúcares, para mantener la hidratación del protoplasma y como vehículo para el transporte de nutrientes absorbidos por la raíz (Marschner, 1995). Si no hay agua suficiente en el suelo, estos procesos se reducen.

El pH ligeramente ácido del agua lluvia al contacto con el CO<sub>2</sub> del suelo y la consecuente formación de ácido carbónico produce protones que promueven la meteorización de las rocas y liberación de potasio, calcio, manganeso y aumentan la solubilidad de carbonatos, sulfatos y fosfatos. Sin embargo, si las precipitaciones son intensas, se produce el fenómeno de lixiviación o lavado, los nutrientes son arrastrados hacia capas más profundas del suelo, disminuyendo la fertilidad de este y dándole un carácter ácido (Castro y Gómez, 2010).

El efecto del Clima en los micronutrientes es notorio en el B, pues se presentan deficiencias en la época seca o al inicio de las lluvias, cuando no se encuentran los elementos en solución o cuando hay un crecimiento rápido y no existe la suficiente cantidad de micronutrientes para sostener el crecimiento (Paramanathan, 2012).

La retención de humedad, la aireación y la penetración de la raíz en el suelo son factores que influyen directamente sobre la absorción de nutrimentos, ya sea en las actividades fisiológicas de las plantas, por el volumen de prospección de las raíces y/o la actividad microbial. La aireación del suelo es inversa al contenido de agua, ya que ésta desplaza el oxígeno. La condición de suelos saturados o mal aireados influye indirectamente en la planta por el cambio en la composición química del suelo, ya que los nitratos se desnitrifican y se reducen a gas, los sulfatos se reducen a sulfuros tóxicos y se incrementa la concentración de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, P, Fe<sup>+2</sup>, Mn<sup>+2</sup> y Mo, mientras se reducen las de Al, K, Na, Ca y Mg (Owen, 1995). Si no hay agua suficiente en el suelo, estos procesos se reducen (Castro y Gómez, 2010). Por el contrario, si las precipitaciones son intensas, se produce el fenómeno de lixiviación o lavado, los nutrientes son arrastrados hacia capas más profundas del suelo, disminuyendo la fertilidad de este y dándole un carácter ácido.

En las hojas, el agua lluvia, el rocío o los sistemas de aspersión o nebulización van a provocar un efecto similar. El apoplasto de los tejidos aéreos de las plantas es libremente accesible a los solutos. Estos pueden circular por el mismo mediante procesos pasivos no selectivos, como la difusión y el flujo de masas, y ser intercambiados libremente con el medio externo, razón por la cual se le conoce a este espacio como espacio libre aparente (su concentración y contenidos de elementos varían).

Lo anterior se corrobora para el caso del Mn foliar en palma de aceite en la región del Upía departamento del Meta (Colombia) (Santacruz *et al.*, 2004; Munévar, 2011).

Las precipitaciones acuosas, provocan el lavado de iones desde el espacio libre aparente, bien sea por un proceso de intercambio iónico o bien por disolución y arrastre. En función de las condiciones ambientales, la pérdida de nutrientes por este proceso puede suponer un porcentaje considerable del contenido total de la planta, principalmente cationes (Castro y Gómez, 2010).

En experimento realizado en Costa Rica, la deposición de residuos de cosecha, el crecimiento de los tallos, el carácter alofánico del suelo y algunas prácticas de manejo como el raleo, condicionaron que la variación de la concentración de algunos elementos fuera importante a través del año, en hojas de chontaduro (Boniche *et al.*, 2008). Los mismos autores, recomiendan realizar el muestreo foliar, como herramienta del diagnóstico nutricional en el mes de marzo, cuando la concentración de los nutrientes se encuentra en los rangos más altos y la plantación se aproxima a la época de mayor crecimiento y producción (junio a enero).

En el caso de la variación estacional en Costa Rica, se ha encontrado que el contenido foliar de N, P, Mg y Ca es mayor durante la estación de lluvias. En el caso del K, el contenido es mayor durante los meses menos lluviosos. Estas fluctuaciones son, en parte, un efecto de los antagonismos que existen entre bases en la hoja, y de la humedad del suelo sobre la disponibilidad de elementos. Las fluctuaciones en cuestión también están fuertemente asociadas a la demanda para la producción, que también fluctúa en el año (Durán *et al.*, 1999).

#### *Fertilización con micronutrientes en palma de aceite*

El conocimiento del estado fisicoquímico de los suelos es sumamente importante para entender las reacciones que se están realizando y cómo ello influye en la deficiencia o exceso de los nutrimentos en la hoja 17 de la palma de aceite, por ende, en la producción, en la escogencia de los correctivos y fertilizantes y sus fuentes (Owen, 1995; Donough, 2008).

Los requerimientos de nutrientes de la palma de aceite varían ampliamente y dependen del rendimiento meta, el tipo de material utilizado, la distancia de siembra, su edad, tipo de suelo, las condiciones de cobertura del suelo, así como el clima. Se pueden distinguir tres tipos de demanda de nutrientes que al sumarse representa la absorción total (Goh y Härdter, 2012):

- Nutrientes extraídos en la cosecha de los racimos de fruto.
- Nutrientes reciclados al suelo en las hojas podadas, inflorescencias masculinas y lavado de Hojas.
- Nutrientes inmovilizados en la biomasa de la palma

Los nutrientes extraídos en la cosecha pueden ser reemplazados reciclando los residuos del cultivo, tales como los racimos desfrutados (tusas) y el efluente de la planta extractora de aceite crudo de palma, lo cual no siempre se hace, y por la adición de fertilizantes minerales, para evitar el agotamiento de los nutrientes del suelo almacenados.

Las hojas podadas se cortan en la cosecha y durante rondas periódicas de poda (1-3 al año). En plantaciones adultas, cada palma produce de 20-30 hojas/año y materia seca aproximada de 10t/año.

Los nutrientes contenidos en las hojas podadas y las inflorescencias masculinas regresan al suelo cuando son quitadas de la palma y por el lavado que ejerce la lluvia a través del dosel de hojas. Los nutrientes inmovilizados en el tronco de la palma (parte de la biomasa) regresan al suelo en la resiembra, y en una plantación vieja se toman disponibles para la absorción de la nueva palma después de 6-12 meses de la tumba. Se ha sugerido que una porción de los nutrientes contenidos en el tronco puede ser removilizada durante periodos en los que el suministro de nutrientes del suelo es insuficiente (Inpofos, 2013; Goh y Hårdter, 2012)

*Requerimientos de micronutrientes*

Datos sobre el contenido de elementos menores en la palma de aceite son muy escasos. En las tablas 3 y 4 se presentan los valores reportados por Owen (1992).

Tabla 3. Estimativo anual de absorción de microelementos por palma adulta (g/palma).

Componente Mat. Vegetal	Gramo/palma			
	B	Cu	Zn	Mn
Acumulativo	0,34	0,33	53	3,16
Hojas podadas	0,85	0,60	1,20	20,00
Racimos de fruto	0,36	0,79	0,82	2,52
Total	1,55	1,72	3,55	25,68

Fuente: Owen (1992).

Tabla 4. Acumulativo promedio anual de microelementos en la parte aérea de la palma africana según la edad (g/palma).

Edad en el campo (meses)	Gramo/palma				
	B	Cu	Zn	Mn	Fe
14	0,1	0,1	0,3	0,8	1,3
40	1,1	1,4	3,1	19,2	30,0
64	1,6	1,7	6,4	34,9	34,8
104	3,1	3,0	9,5	36,1	61,2
129	3,7	4,6	9,3	30,5	68,6
160	4,5	4,7	18,4	50,9	106,9

Fuente: Owen (1992).

Es interesante notar que a partir de los 40 meses se incrementa significativamente la absorción de elementos menores por parte de la palma. El contenido de Cu y B son los menores, Zn supera a los anteriores en 2 a 3 veces, el manganeso es absorbido 11 veces más que el boro y el hierro es absorbido 21 veces más que el boro (Owen, 1992).

Se sabe que la extracción de nutrientes es baja durante el primer año debido al estrés de trasplante, pero se incrementa gradualmente entre los años 1 a 3, estabilizándose en los años 5 y 6. Este conocimiento ha llevado a aumentar las

aplicaciones tempranas de fertilizantes, lo cual, combinado con la selección del material de plantación y mejores técnicas de vivero, permite producción temprana en el tercero a sexto año después de la plantación. En regiones sin limitantes climáticas, se han logrado rendimientos de más de 25 t ha<sup>-1</sup> de RFF en el segundo año de cosecha, o sea, al cuarto año de establecida la plantación (Estrada *et al.*, 2010; Munévar, 2011).

En revisión más reciente Goh y Hårdter (2012) se reportan los siguientes contenidos de micronutrientes necesarios para producir una tonelada de racimos de fruto fresco: B: 2,15 g; Cu: 4,76 g; Zn: 4,93 g; Mn: 1,51g; y Fe: 2,47 g.

Los datos mencionados corresponden a experimentos clásicos en palmas tipo Dura cultivadas en suelos arcillosos costeros en Malasia, los cuales se han usado ampliamente en los últimos 30 años (Donough, 2008), pero se necesita nuevos datos relacionados con la absorción de nutrientes en palmas tipo Ténera, Clonales e Híbridos cultivados en diferentes ambientes nacionales y en el exterior (Tui lee *et al.*, 2011; Siew Kee *et al.*, 2012).

*Niveles críticos y repuesta agronómica*

El nivel crítico es la concentración o tenor de cualquier elemento en la hoja o el suelo (Castro y Gómez, 2010) debajo del cual existe gran posibilidad de lograr una respuesta positiva con la aplicación de un fertilizante. Por lo general, los niveles críticos hallados independientemente en diferentes regiones del mundo son del mismo orden de magnitudes (Owen, 1992).

Aunque no existen niveles críticos de los contenidos de nutrimentos en el suelo, los datos del análisis de suelos se pueden usar para estudiar los incrementos o reducciones de los nutrimentos en la capa superficial y en el subsuelo, a través del tiempo (Owen, 1995).

El análisis foliar determina la composición química de las hojas. Además, sirve para reconocer anticipadamente cualquier deficiencia o abundancia de los elementos. La composición óptima es aquella en que la palma está en máximo desarrollo y/o producción para determinada región. El análisis foliar detecta deficiencias nutricionales en su fase inicial, por lo tanto, es indispensable la estandarización del método de toma de las muestras (número de las hojas, el tejido, edad y número de palmas) y el análisis químico en sí. Para evitar la reacción causada por la lluvia las muestras de tejidos deben tomarse al comienzo de la época seca o cuando el déficit hídrico es menor de 250 mm (Owen, 1995; Malavolta, 1998, Frye, 2002; Donough, 2008)

Chapman y Gray (Owen, 1992) descubrieron que la composición química de la porción media de los folíolos de la parte media de la hoja 17 mostró menos variación y fue más sensitiva a la aplicación de fertilizantes.

Al integrar al análisis foliar con la evaluación del suelo y el análisis de aguas de riego en asocio con los requerimientos nutricionales totales del cultivo (unidades de manejo), es posible detectar la existencia de bloqueos nutricionales asociados con el movimiento de elementos entre la solución

del suelo y la biomasa aérea, bien sea por uso inadecuado de fertilizantes o acciones físicas (Owen, 1992; Witt *et al.*, 2005; Castro y Gómez, 2010).

Un resumen de los niveles críticos foliares reportados por diferentes autores se presenta en la Tabla 5.

Según Castro y Gómez (2010), para condiciones colombianas, las investigaciones sobre niveles críticos para varios cultivos fueron elaboradas durante 30 años de existencia del programa Nacional de suelos del ICA. Dicha

información no se ha actualizado desde 1994, con pocas excepciones. Existen, sin embargo, niveles críticos de carácter edáfico aplicados directamente a cultivos (entre ellos, café, palma de aceite, caña de azúcar, banano, arroz y flores), los cuales correlacionan con sus exigencias nutricionales. Estos datos son una buena ayuda diagnóstica, pero es mejor determinarlos a nivel local, lo que demanda un esfuerzo investigativo importante.

Tabla 5. Micronutrientes importantes en palma de aceite

Elemento	Nivel crítico(hoja 17)	Observaciones	Referencia
Cloro	0,50%	Aumento producción y reduce K	Vonuvexkulk (1988)
	0,45-0,60%	Respuesta a aplicación con Cl con contenido foliar <0,2 %. Su exceso baja tasa extracción aceite	Corrado (1988) Goh y Härdter (2012)
	0,51-0,69%	Bajo<0,50; alto > 0,70	Munévar (2001)
Boro	25-30 ppm	Dosis > a 30 g/palma, deben fraccionarse en dos aplicaciones.	Ng (2002)
	8 ppm para Colombia, 15-20 ppm para Malasia		
	0-20 ppm		Goh y Härdter (2012)
	15-25 ppm		Munévar (2001)
Zinc	16-17 ppm	Bajo< 15 ppm; alto > 18 ppm	Munévar (2001)
	15-20 ppm	Responsable del amarillamiento de Turba (antes Cu). Correlación significativa y positiva entre el contenido de zinc de la hoja con el rendimiento	Ng (2002)
Molibdeno	13,50-14,90 ppm	Bajo< 13,40 ppm; alto > 13,50-14,90 ppm	Munévar, 2001
	0,5 -0,8 ppm	Síntomas deficiencias si Mo foliar <0,1 ppm	Ng (2002) Goh y Härdter (2012)
0,5 ppm			
Cobre	25-35 ppm	Deficiencia concentración foliar si Cu<3ppm	Ng (2002)
	10 ppm		
	5-8 ppm		Goh y Härdter (2012)
	5-8 ppm		
Manganeso	4,40-4,90 ppm	Bajo< 4,30 ppm; alto > 5,0 ppm	Munévar (2001)
	200 ppm	Síntomas deficiencias si Mn hoja 17 <25 ppm	
	150-200 ppm	Correlación significativa y positiva entre el contenido de Mn en la hoja con el rendimiento.	
	50-200 ppm	Bajo< 134 ppm; alto > 150 ppm	Goh y Härdter (2012)
135-149 ppm			
Hierro	50-250 ppm	Deficiencia si Fe <50ppm En su ausencia las hojas jóvenes se vuelven blanquecinas. -Es deficiente en suelos encharcados	Goh y Härdter (2012)
	72-79 ppm	Bajo< 71 ppm; alto > 80 ppm	Munévar (2001)

De acuerdo con lo anterior Castro y Gómez (2010), presentan una guía general para interpretación de suelos con fines agrícolas y para suelos palmeros en Colombia se reportan los siguientes valores (Tabla 6).

*Efecto y dosis de micronutrientes*

Entre los microelementos, el que desempeña un papel de más importancia en el crecimiento de la palma, es el boro porque su deficiencia provoca anomalías en el desarrollo que se

traduce en perjuicios para el árbol y la producción (Owen, 1992; Arias y Beltrán, 2010).

La deficiencia de B es más probable en suelos de pH alto (>7,5) o muy ácido (<4,5), suelos arenosos o de turba y condiciones de lluvia excesiva. Por ser de baja movilidad los síntomas de deficiencia se presentan en las hojas jóvenes. Se han observado varios síntomas de las distintas fases del síndrome. El más común es el foliolo en forma de gancho,

pero existen otros síntomas como el arrugamiento transversal del foliolo, bandas blancas, el doblamiento abrupto de la hoja, punta de cerdas, hoja pequeña y hasta la muerte (Arias y Beltrán, 2010; Gog y Härterd, 2012).

En fase de vivero Owen (1992), recomienda dosis de solubor al 5% para corregir deficiencias de boro e incluso dosis de 0,2 g al suelo de la bolsa, cada dos meses, para evitar que vuelvan a aparecer síntomas.

Otros autores recomiendan el uso de fertilizante foliar completo en palmas de 3-6 semanas y fertilizante compuesto

a la bolsa entre la 6 - 16 semana (Tabla 7) (Baptista *et al.*, 2008; Gillbanks, 2012).

La deficiencia se acentúa al comienzo de la producción de fruto entre 24-30 meses cuando el desarrollo de los racimos requiere de altos niveles de carbohidratos. Aplicaciones de 100-150 g/palmas distribuidas en 2 a 3 aplicaciones al comienzo del segundo año, corrige el problema. Palmas con 6-8 ppm en las hojas al aplicar boro al suelo aumenta en dos meses a 15 ppm (Owen, 1992).

Tabla 6. Guía básica para la interpretación de análisis de suelos en palma de aceite

Parámetro	Unidades	Calificación		
		Bajo	Medio	Alto
pH		<4,5	4,5-5,5	>5,0
Conductividad eléctrica	dS.m <sup>-1</sup>	<2,0	2,0-4,0	>4,0
Materia orgánica	%	<2,0	2,0-4,0	>4,0
CIC	cmol.kg <sup>-1</sup>	<10	10-20	>20
P (Bray II)	ppm	<15	15-20	>20
K	cmol.kg <sup>-1</sup>	<0,2	0,2-0,4	>0,4
Mg	cmol.kg <sup>-1</sup>	<0,2	0,2-0,3	>0,3
Ca	cmol.kg <sup>-1</sup>	<3	3-6	>6
S	ppm	<10	10-15	>15
B	ppm	<0,25	0,25-0,50	>0,50
Fe	ppm	<15	15-30	>30
Cu	ppm	<0,5	0,5-1,5	>1,5
Mn	ppm	<5	5-10	>0,50
Zn	ppm	<1,0	1,0-2,0	>30
Saturación de Al	%	<25	25-50	>50
Saturación de K	%	<3	3-6	>6
Saturación de Ca	%	<20	20-40	>40
Saturación de Mg	%	<10	10-20	>20
Saturación de Na	%	<10	10-15	>15

Fuente: Munévar (2001).

Tabla 7. Programa genérico de fertilización para plántulas de palma de aceite hasta los 12 meses de edad

Etapa	Edad de las plántulas	Dosis por palma		Fertilizantes
		Baja	Alta	
1 a 2 hojas	3-6	Fertilizante foliar completo de acuerdo con las indicaciones del fabricante		
20 hojas	6-16	5 g por 2 semanas	5 g por 2 semanas	NPK 15-15-15
	20-32	15 g por 4 semanas	8-10 g por 2 semanas	NPK 12-12-17-2
	36-44	20 g por 4 semanas	30 g por 4 semanas	NPK 12-12-17-2
	>48	30 g por 4 semanas	35 a 40 g por 4 semanas	NPK 12-12-17-2

Fuente: Gillbanks (2012).

Sin embargo, Goh y Härterd (2012) reportan dosis de aplicación de B de 10 g/palma en el primer año y de 15 a 35g/palma para plantas adultas. Asimismo, las aplicaciones regulares de fertilizante de B son importantes en ambientes de altos rendimientos y uso de grandes cantidades de N, P y K.

De otro lado las aplicaciones de cloro aumentan el contenido de cloro en el tejido, incrementan la producción (mayor relación aceite/racimo, almendra/racimo, mayor peso de almendra, mayor peso de fruto y mayor número de racimos) y reducen el contenido de potasio (Owen, 1992). Su exceso da por resultado un aumento en el contenido de agua en el

mesocarpio y por lo tanto reducción en la tasa de extracción de aceite (Goh y Hårdter, 2012).

La deficiencia de Cu se observó primero en suelos de turba (en donde el Cu forma complejos con compuestos orgánicos) y se describió como clorosis de la copa media. Desde entonces, la deficiencia de Cu se ha identificado en suelos de texturas gruesas ferralíticos y ferruginosos, pobres en cobre y suelos calcáreos desarrollados a partir de caliza. La deficiencia de Cu se acentúa con la aplicación de fertilizantes de N y de P, pero disminuye con la aplicación de fertilizante potásico.

Trabajos en Malasia., con aplicaciones de 15 g de sulfato de cobre al hueco a la siembra, 30 g un año después, 60 g dos años después y posteriormente 85 g cada año después no permitió el "Peat yellowing" en suelos orgánicos y mantuvo el contenido de cobre en la hoja entre 5,58 y 6,18 ppm (Owen, 1992). En suelos minerales la deficiencia de Cu puede corregirse con una sola aplicación de 10-25 g de Cu/palma, como sulfato de cobre (Goh y Hårdter, 2012).

Más recientemente se ha reportado la deficiencia de hierro (Goh y Hårdter, 2012) en suelos encharcados o condiciones de mal drenaje. En su ausencia las hojas jóvenes se vuelven blanquecinas pero las más viejas se tornan amarillas. El crecimiento cesa y la muerte puede ocurrir después de un año en las palmas con deficiencia grave.

Las palmas afectadas con deficiencia de Fe pueden ser tratadas con tres aplicaciones foliares de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (0,5%) a intervalos de una semana. Alternativamente, la infusión en la raíz con cinco aplicaciones de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (15g/L) es efectiva para corregirla (Goh y Hårdter, 2012).

La deficiencia de Mn a veces ocurre en palmas de aceite que crecen en suelos tropicales muy lixiviados, suelos de turba profundos o cuando se han aplicado grandes cantidades de cal a suelos arenosos (< al 10% de arcilla). Como resultado, se reduce la actividad fotosintética, inhibición del crecimiento de la raíz, lignificación reducida de los tejidos y por tanto una susceptibilidad de las raíces al ataque de enfermedades. Las hojas que recién emergen se vuelven más pequeñas y cloróticas. En los casos graves, la clorosis y la necrosis afectan a la flecha recién aparecida, antes que los foliolos de la hoja se hayan expandido (Goh y Hårdter, 2012)

El sulfato de manganeso debería aplicarse sobre la corona circular, pero la recuperación completa del tamaño y vigor del dosel puede ocurrir solo unos dos años después de las aplicaciones de corrección. Se recomienda su aplicación cuando se identifica su deficiencia en dosis de 50 g/palma como sulfato o un rociado foliar de 50gm de Mn/L (Goh y Hårdter, 2012).

La deficiencia de Zn se presenta en suelos ácidos muy meteorizados y en suelos calcáreos, pero muchos estudios han demostrado que se puede inducir por altas aplicaciones de fertilizante de P. Las palmas deficientes en Zn son raquílicas y el crecimiento de las raíces puede aumentarse a expensas de los retoños. Trabajos recientes por Gurmit *et al.* (1987) y Goh y Hårdter (2012), sugieren que el Zn es el factor primario en el amarillamiento de turba y no el Cu.

Dos aplicaciones de sulfato de Zn (1 g/L) como aspersión foliar fueron efectivas para corregir su deficiencia en suelos de turba y se ha demostrado que aumenta la producción de Racimos de frutos de 12%-78% cuando se aplica a palmas afectadas.

Las palmas jóvenes deben empaparse con una solución de sulfato de Zn, aplicando 4,5 L/palma. En palmas tratadas con Zn, la absorción de K generalmente aumenta, y los tenores de N, P y Cu foliares mejoran en palmas deficientes tratadas con Zn.

La deficiencia de Mo se presenta en suelos muy ácidos (pH< 4) debido a la absorción en los sesquióxidos de este (óxidos de aluminio y hierro). No se ha reportado deficiencia de Mo en palma de aceite (Goh y Hårdter, 2012).

La toxicidad de aluminio (Al), se extiende en los trópicos húmedos donde los suelos son ácidos y muy meteorizados. La toxicidad de Al se manifiesta especialmente en la aparición de deficiencias de K y Mg de las palmas jóvenes, pero puede ser corregida aplicando roca fosfórica o dolomita en el trasplante para mejorar el pH del suelo. Se ha demostrado que los fertilizantes de magnesio también reducen el efecto de la toxicidad de Al en el crecimiento de la planta en una variedad de cultivos (Cristancho *et al.*, 2011; Goh y Hårdter, 2012).

La toxicidad de níquel puede ser un problema difícil en suelos derivados de rocas ultrabásicas o de serpentina. Las palmas afectadas por toxicidad de níquel pueden mostrar patrones cloróticos estrechos, a manera de red de pescar en las hojas más jóvenes, además, el crecimiento puede retardarse gravemente. No se recomienda plantar palma de aceite en este tipo de suelos (Goh y Hårdter, 2012), aunque se pueden neutralizar sus efectos elevando el pH (encalado) y adicionando materia orgánica, la cual tiene capacidad de formar complejos orgánicos insolubles con él microelemento (García, 2002).

Las toxicidades de micronutrientes no son comunes en los trópicos húmedos y generalmente se deben más a aplicaciones excesivas de fertilizantes dirigidos al suelo (Cu y B) o al follaje (Mo) (Goh y Hårdter, 2012).

Los resultados experimentales de fertilización en sitio definitivo en Colombia son muy pocos. Se han realizado experimentos en el Centro de Investigación La Libertad en suelos de la Clase III en el piedemonte llanero y en el Centro de Investigación El Mira, en suelos aluviales en la llanura pacífica, pero estos solo incluyen al boro en donde las dosis oscilan entre 25-75 g/palma en suelos de piedemonte y de 25 a 35 g/palma en suelos aluviales, dependiendo de la edad de la palma.

En revisión hecha por Castro y Gómez (2010), basados en el método de antecedentes agronómicos de respuestas por cultivo, se reportan los rendimientos favorables a diferentes rangos de aplicación de nutrientes para palma de aceite en suelos colombianos. La selección del mayor o menor valor depende de la oferta edáfica y la meta de rendimiento.

Para los micronutrientes se registran los siguientes rangos (en kg/ha) necesarios para obtener un rendimiento de RFF entre

25 y 30 t/ha; B: 3-5 kg/ha; Cu: 1-2 kg/ha; Zn: 3-5 kg/ha; Mn: 1-6 kg/ha y Fe 1-4 kg/ha.

Según Castro y Gómez (2010), aunque este tipo de trabajos brinda información valiosa acerca de los efectos de los diferentes elementos sobre el rendimiento y calidad de los cultivos o sobre los contenidos de nutrientes en las hojas, las respuestas pueden variar considerablemente en función del tipo de suelos, el clima y el tipo del material vegetal.

## Conclusiones

Los elementos menores tienen varias funciones, entre ellas se anotan las siguientes: facilitan la entrada de otros elementos a las células y ayudan a orientarlos en su respectiva posición donde ellos pueden llevar a cabo su función primordial; funcionan como catalizadores y actúan en los procesos de oxidación y reducción.

La continua y alta aplicación de enmiendas y fertilizantes (Ca, N, P, K, Mg) induce a las deficiencias de B, Mn, Zn, Cu y Fe. Además, el exceso de un micronutriente puede inducir a la deficiencia de otro.

Se debe realizar un manejo adecuado de las fuentes de materia orgánica en las plantaciones ya que influye en la disponibilidad por complejamiento-quelación y óxido-reducción, de cationes metálicos como zinc, cobre, boro, hierro y manganeso, respectivamente.

El pH del suelo es otro factor que influye mucho en la solubilidad de los micronutrientes, pero no se debe olvidar el material parental y la mineralogía, pues es fundamental en la disponibilidad actual y potencial de los micronutrientes.

Una de las ventajas de la mecanización es la agilidad de la aplicación. En la medida en que se emplee la mayor cantidad de herramientas para el manejo de la nutrición se tendrá una mayor eficiencia y menores costos de producción.

El muestreo de suelos y foliar son complementarios y ayudan a comprender la respuesta agronómica del cultivo de Palma frente a un programa integral de nutrición y fertilización.

Si se maneja bien la nutrición se reducen los problemas de enfermedades y plagas.

La identificación oportuna de deficiencias nutricionales permite igualmente tomar decisiones adecuadas y correctivas en procura de la mayor productividad.

Existen varios niveles críticos del análisis de tejido de acuerdo con el país o investigadores. Es necesario obtener niveles críticos para Colombia usando laboratorios propios.

Los distintos métodos de diagnóstico de los requerimientos de fertilización (visual, análisis del suelo y tejido) deben complementarse y correlacionarse con experimentación de fertilidad de suelos hechas en las plantaciones.

## Referencias

Acosta, A., Ramirez, F., Albertazzi, H. (2007). *El papel del silicio en el desempeño de palmas con flecha seca en una plantación comercial de palma aceitera en Quepos, Costa Rica*. Palmas (28). Especial. Tomo 1.389-393.

- Agroestrategias Consultores. (2013). *Nutrición mineral de las plantas*. En: <http://agroestrategias.com>. 4p.; consulta: noviembre de 2013.
- Alloway, B. J. (2007). *¿Qué hay de nuevo en la nutrición con Zinc? Agronomía y economía*. New Ag International, 36-40.
- Alloway, B. J. (2008). *Zinc in soils and crop nutrition*. Second edition, published by IFA and IZA. Brussel, Belgium and Paris, France .139p
- Arias, N., Beltrán, J. (2010). *Diseño y evaluación del programa de manejo nutricional en palma de aceite*. Cenipalma. Javegraf. Bogotá D.C. pp.25-111.
- Arias, N. y Munévar, F. (2004). *Caracterización de los suelos de la zona central palmera de Colombia*. Palmas (25). Especial, Tomo II.
- Arias, N.A. y Munévar, F. (2006). *Riesgos de toxicidad con boro en viveros de palma de aceite*. Palmas 27(1): 37-44.
- Baptista da Luz, P., Duarte, P. y Reis, A. (2008). *Effect of foliar and substrate fertilization on lady palm seedling growth and development*. Journal of plant nutrition. 31.1313-1320.
- Boniche, J., Alvarado, A., Molina, E., Smyth, T. J. (2007). *Descomposición y liberación de carbono y nutrimentos de los residuos de cosecha en plantaciones de Pejibaye para palmito en Costa Rica*. Agro. Costarricense (1)32: 73-86.
- Boniche, J., Alvarado, A., Molina, E y, Smyth, T. J. (2008). *Variación estacional de nutrimentos en hojas de pejibaye para palmito en Costa Rica*. Agro. Costarricense, 32(1): 55-72.
- Bonilla, C.R., Castillo, L., García, A. y Salazar, F. (1998). *Boro y Zinc: Dos elementos limitantes en Colombia*. ICA. Programa Suelos. Produmedios.47p.
- Broschat, T. (2009). *Palm nutrition and fertilization*. Hortechology. (4)19: 690-694.
- Brown, P. H. (2007). *Boro: Probablemente el mayor mercado de micronutrientes por desarrollar. Una entrevista*. Productos y Tendencias. New Ag International, 16-21.
- Burbano, H. (1998). *Interacciones de la materia orgánica y los elementos menores*. Pp.31-46. En: Silva, M. (ed). Actualidad y futuro de los micronutrientes en la agricultura. SCCS. Comité regional del Valle del Cauca. Prolabo Ltda. Santafé de Bogotá D.C. 196p.
- Calderón, G. A. (2008). *Módulo V: Influencia de Parámetros abióticos sobre la nutrición*. Departamento de producción agraria. Área de fisiología vegetal. ETSIA. Universidad Politécnica de Cartagena. En III Máster de Nutrición Vegetal en cultivos Hortícolas Intensivos. 46p
- Castro, H. F. y Gómez, M. I. (2010). *Capítulo IV. Fertilidad de suelos y fertilizantes*. En: Burbano H.; Silva, F. Ciencia del suelo. Principios Básicos. Primera Edición. SCCS. Editora Guadalupe S.A. Bogotá D.C. 594p.
- Cristancho, J. A., Hanafi, M. M., Syed, S. R., Rafii, M. M. (2011). *Alleviation of soil acidity improves the performance oil palm progenies planted on an acid ultisol*. Soil and Plant Science.61: 487-498.

- Cristancho, J. A., Munévar, F., Acosta, A., Santacruz, L. y Torres, M. (2007). *Relación de las características edáficas y el desarrollo del sistema de raíces de la palma de aceite (Elaeis guineensis Jack.)*. Palmas 28(1): 21-29.
- Dávila, G., Rojas, L. A. y Guerrero, R. (2000). *Disponibilidad de microelementos para la palma de aceite (Elaeis guineensis Jack.) en el piedemonte llanero colombiano, en dos períodos climáticos*. Palmas. Tomo 1(21) Especial.83-91.
- De Ávila, F., de Oliveira, L. A., Korndöner, A. P., Korndöner, G. E. (2011). *Silicio: Un elemento benéfico e importante para as plantas*. Inf. Agro.Brasil. (Junio)134:14-20.
- Ditschar, B., Jaramillo, R. y Fairhurst, T. (2012). *La palma de aceite en América Central y América del Sur*. pp.13-31. En: Fairhurst, T., Härdter, R (eds). Palma de aceite. Manejo para rendimientos altos y sostenibles. Primera edición. IPNI, IPI. 404 p.
- Donough, C., (2008). *La nutrición y fertilización de la palma aceitera*. Infor. Agro. (Abril) 69: 1-8.
- Durán, N., Salas, R., Chinchilla, C. y Peralta, F. (1999). *Manejo de la nutrición y fertilización en palma aceitera en Costa Rica*. En: XI congreso nacional agronómico/ III congreso nacional de suelos. Conferencia 85: 305-316.
- Escobar S. G. (2007). *Importancia de absorción de potasio, calcio y cloro en el manejo de la fertilización potásica. La experiencia de Indupalma S.A. en la zona de San Alberto*. Palmas (28). Especial. Tomo 1. 446-448.
- Estrada, C., Salgado, S. y López, P. (2010). *Capítulo 2. Fertilización NPK en la palma de aceite*. En: Velazques, J., A. Gómez. Palma Africana en Tabasco. Primera edición. Universidad de Juárez autónoma de Tabasco. México D.C. 228 p.
- Ferraris G. (2013). *Micronutrientes en cultivos extensivos. ¿Necesidad actual o tecnología para el futuro?* Desarrollo rural INTA EEA Pergamino, Buenos Aires.19 p.
- Forero, D. C., Hormaza, P. y Romero. H. M. (2011). *Phenological growth stages of African oil palm (Elaeis guineensis)*. Annals of Applied Biology, 160: 56-65.
- Frye, A. (2002). *Técnicas para el diagnóstico del estado nutricional de los cultivos con énfasis en análisis foliar*. pp. 147-162. En: Castilla, A., González, A., Montenegro, O., Herrera, P.(eds). Estrategias para la productividad de los suelos agrícolas. SCCS. Capítulo Tolima. Imágenes gráficas. Cali.193p.
- García, A. (1998). *Efectos tóxicos de los micronutrientes y de otros elementos*. pp. 13-30. En: Silva, M. (ed). Actualidad y futuro de los micronutrientes en la agricultura. SCCS. Comité regional del Valle del Cauca. Prolabo Ltda. Santafé de Bogotá D.C. 196p.
- García, A. (2002). *Diagnóstico y manejo de la fertilidad en suelos alcalinos*. pp. 173-193. En: Castilla, A., González, A., Montenegro, O., Herrera, P.(eds). Estrategias para la productividad de los suelos agrícolas. SCCS. Capítulo Tolima. Imágenes gráficas. Cali.193p.
- García, A. (2002). *Manejo de suelos con acumulación de sales* pp. 81-104. En: Castilla, A., González, A., Montenegro, O., Herrera, P.(eds). Estrategias para la productividad de los suelos agrícolas. SCCS. Capítulo Tolima. Imágenes gráficas. Cali.193p.
- Garófalo, J., Ferhman, A., Regalado, R. y Balerdi, C. (2003). *La "copa encrespada en palmas" y la deficiencia de manganeso*. Servicio de extensión del condado de Miami-Dade. University of Florida. Hoja informativa No 89: 1-6.
- Gillbanks, R. A. (2012). *Procedimientos y prácticas agronómicas establecidas*. pp. 135-172. En: Fairhurst, T., Härdter, R (eds). Palma de aceite. Manejo para rendimientos altos y sostenibles. Primera edición. IPNI, IPI. 404 p.
- Goh, K. J. y Härdter, R. (2012). *Nutrición General de la palma de aceite*. pp. 213-256. En: Fairhurst, T., Härdter, R (eds). Palma de aceite. Manejo para rendimientos altos y sostenibles. Primera edición. IPNI, IPI. 404 p.
- González, A. (2002). *Caracterización y Manejo de suelos ácidos*. pp. 45-54. En: Castilla, A., González, A., Montenegro, O., Herrera, P. (eds). Estrategias para la productividad de los suelos agrícolas. SCCS. Capítulo Tolima. Imágenes gráficas. Cali. 193p.
- Inpofos (2013). *Palma aceitera: Manejo de nutrientes y fertilización en fase inmadura* En: <http://www.inpofos.org/ppiweb/ltamn.nsf>. 5p.; consulta: noviembre de 2013.
- Kiang, K. K., Goh, K. J. (2007). *Manejo integrado de la nutrición en la palma de aceite*. Palmas (28). Especial. Tomo 1. 394-411.
- Kirkby, E., V. Römheld, (2008c). *Micronutrientes en la fisiología de las plantas: funciones, absorción y movilidad (tercera parte)* Inf. Agro. Hisp. (Julio) 70.10-13.
- Kirkby, E., V. Römheld, V. (2008b). *Micronutrientes en la fisiología de las plantas: funciones, absorción y movilidad (segunda parte)* Inf. Agro. Hisp. (Abril) 69: 9-13.
- Kirkby, E. y Römheld, V. (2008a). *Micronutrientes en la fisiología de las plantas: funciones, absorción y movilidad (primera parte)* Inf. Agro. Hisp. (Enero) 68.1-6.
- López, Y. (1998). *Funciones e interacciones de los elementos menores en plantas y suelos*. pp.1-12. En: Silva, M. (ed). Actualidad y futuro de los micronutrientes en la agricultura. SCCS Comité regional del Valle del Cauca. Prolabo Ltda. Santafé de Bogotá D.C.196 p.
- Lora. R. (1998). *Análisis de suelos y material vegetal para micronutrientes*. pp. 47-56. En: Silva, M. (ed). Actualidad y futuro de los micronutrientes en la agricultura. SCCS. Comité regional del Valle del Cauca. Prolabo Ltda. Santafé de Bogotá D.C. 196p.
- Malavolta, E. (1998). *Aspectos de la aplicación foliar de micronutrientes*. pp.67-90. En: Silva, M. (ed.) Actualidad y futuro de los micronutrientes en la agricultura. SCCS. Comité regional del Valle del Cauca. Prolabo Ltda. Santafé de Bogotá D.C. 196 p.
- Marschner, H. (1995). *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Ed. Academy Press, 2da. Ed. Cambridge. 889p.

- Microfertisa, (2012). *Manual técnico de fertilización de cultivos*. Ed. Digiprint E.U. Bogotá D.C. Colombia. 165 p.
- Miranda, C., Araújo, C. W., De Brito, A. y Ribeiro, M. R. (2011). *Teores de Fe, Mn, Cu, Zn, Ni e Co em solos de referencia de Pernambuco*. R. Bras. Ci. Sol.35.1057-1066.
- Munévar, M. F. (2008). *Concepción integral del manejo nutricional de la palma de aceite en Colombia*. En: Jiménez U., F.(ed). Actualización en fertilización de cultivos y uso de fertilizantes. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá.27-39.
- Munévar, F., López, A., Rochels, B., Villamizar, O., Reyes, A. (2011). *Impacto del manejo agronómico integral en la productividad de la palma de aceite en Las Palmas Montecarmelo*. Palmas 32(4): 42-51.
- Munévar; F. (2001). *Fertilización de la palma de aceite para obtener altos rendimientos*. Palmas (22) 4: 9-17.
- Ng, S. (2002). *Nutrition and Nutrient Management of the Oil Palm – New Thrust for the Future Perspective. Potassium For Sustainable Crop Production*. International Symposium On Role of Potassium. 415-429.
- Nur, S., Sariah, M., Zaharah, A. R. (2012). *Suppression of basal stem rot disease progress in oil palm (Elaeis guineensis) after cooper and calcium supplementation*. Pertanika Journal. Trop.Agri. Sci.35(S): 13-24.
- Ortega, A. y Malavolta, E. (2012). *Los más recientes micronutrientes vegetales*. Inf. Agro. Hisp.7 (Sep): 10-25.
- Owen, B. E. J. (1995). *Características físico-químicas del suelo y su incidencia en la absorción de nutrimentos, con énfasis en el cultivo de palma de aceite*. Palmas (16)1: 31-39.
- Owen, E. B. (1992). *Fertilización de la palma africana (Elaeis guineensis Jack.) en Colombia*. Palmas, (13)2: 39-64.
- Paramanathan, S. (2012). *Selección de la tierra para la palma de aceite*. pp. 47-78. En: Fairhurst, T., Härdter, R (eds). Palma de aceite. Manejo para rendimientos altos y sostenibles. Primera edición. IPNI, IPI. 404 p.
- Pilarte, F. (2013). *Funciones de los elementos esenciales en los cultivos*. En: <http://www.uam.es/docencia/muesovir/Museovirtual/fundamentos/nutricion/%20mineral/macro/fósforo/htm>. 13 p.; consulta: noviembre de 2013.
- Redshaw, M. (2012). *Utilización de los residuos del campo y de los subproductos de la planta extractora*. pp. 337-350. En: Fairhurst, T., Härdter, R (eds). Palma de aceite. Manejo para rendimientos altos y sostenibles. Primera edición. IPNI, IPI. 404 p.
- Riascos, G. (2002). *Eficiencia de la fertilización en la agricultura de Colombia*. pp. 165-170. En: Castilla, A., González, A., Montenegro, O., Herrera, P.(eds). Estrategias para la productividad de los suelos agrícolas. SCCS. Capítulo Tolima. Imágenes gráficas. Cali,193p.
- Sáenz, M. L. (2006). *Cultivo de la palma africana*. Guía técnica IICA, Managua (Nicaragua). 25 p.
- Santacruz, L., Cristancho, J. A., Munévar, F. (2004). *Variación temporal de los niveles foliares de nutrientes y su relación con la fertilización, la lluvia y el rendimiento de la palma de aceite (Elaeis guineensis Jack.) en la plantación Guaicaramo (Meta, Colombia)*. Palmas (25). Especial: 60-169.
- Siew Kee, N. G., Cheong T. K., Cheng, K., Ooi, H., Yee, L. K., Kayaroganam, P., Uexküll, H. V., Härdter, R. (2012). *Palma de aceite clonal: Producción, eficiencia de rendimiento y requerimientos nutricionales*. pp. 119-134. En: Fairhurst, T., Härdter, R (eds). Palma de aceite. Manejo para rendimientos altos y sostenibles. Primera edición. IPNI, IPI. 404 p.
- Souza, L. H., Ferreira, R., Alvarez, V. H., De Albuquerque, E. M. (2010). *Efeito do pH do solo rizosférico e ão rizosférico de plantas de soja inoculadas com Bradirhizobium japonicum na absorcao boro, cobre, mangânes e zinco*. R. Bras. Ci. Sol. 34: 1641-1652.
- Tui-Lee, C., Rahman, Z. A., Musa, M. H., Norizan, M. S., Check Tan, C. (2011). *Leaf nutrient concentrations in oil palm as affected by genotypes, irrigation and terrain*. JOPE. 2: 38-47.
- Valenzuela, I. G., Torrente, A. (2010). *Capítulo III. Física de suelos*. En: Burbano H.; Silva, F. Ciencia del suelo. Principios Básicos. Primera Edición. SCCS. Editora Guadalupe S.A. Bogotá D.C. 594 p.
- Witt, C., Fairhurst, T. y Griffiths, W. (2005). *Key principles of crop and nutrient management in oil palm*. Better Crops With Plant Food. (3) 89: 27-31.
- Yamada, T. (2000). *Boro: ¿Se están aplicando las dosis suficientes para el adecuado desarrollo de las plantas?* Inf. Agro. (Octubre) 41:4-8.
- Zakaria, Z. Z. (1998). *Manejo de suelos y fertilizantes en plantaciones de palma de aceite en Malasia*. Palmas (19) Especial: 1-11.

Ciencia y Tecnología Agropecuaria es una revista publicada por la Universidad de Pamplona bajo la licencia: [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) (CC BY-NC-SA 4.0)

