

V. NUTRICIÓN MINERAL

Jaime Barrera¹, Marisol Cruz¹, Luz Marina Melgarejo^{1,2}

Marco conceptual

Cada genotipo y especie de planta requiere una nutrición mineral óptima para su normal crecimiento y desarrollo (Kovacik *et ál.* 2007). Asociado a ello, una adecuada nutrición mineral es fundamental para alcanzar una producción agrícola que garantice la seguridad alimentaria, de manera que soporte la creciente demanda de una población mundial que día a día aumenta (FAO 1998).

Hoy más que nunca, la seguridad alimentaria se ha convertido en una preocupación mundial relevante, que ha hecho que se incrementen los esfuerzos por mejorar los sistemas agrícolas productivos, no sólo en términos de cantidad, sino también de calidad (Bourguignon y Chakravarty 2003). El reto de la agricultura en el mundo de hoy, no solamente se dirige a abastecer las necesidades básicas de la población, sino que también debe tener en cuenta el medio ambiente.

El agotamiento de los suelos y el costo de los insumos que se aplican a los cultivos para suplementar su nutrición, son los factores limitantes de la productividad de la actividad agrícola (FAO 1998).

¹ Contribución por igual en la preparación de este tema

² Autor para correspondencia: lmelgarejom@unal.edu.co

Solamente el conocimiento profundo de las necesidades nutricionales de cada especie, el sistema de absorción y transporte de esos diferentes nutrientes y el efecto de las limitaciones nutricionales de cada elemento en el crecimiento y desarrollo de las plantas, permitirán adecuar planes de manejo nutricional en la medida que respondan a las necesidades de los vegetales, evitando aplicaciones innecesarias de abonos, cuyos excesos generalmente se traducen en pérdidas económicas, además de convertirse en contaminantes del suelo, de las fuentes de agua y del aire, afectando al mismo hombre (Van Reuler y Prins 1993).

En la actualidad, uno de los mayores desafíos que enfrenta esta área de la biología vegetal es el desarrollo de un modelo molecular en el que se pueda interrelacionar, por una parte, la modificación genética de la planta y por la otra, la acción de diferentes niveles de nutrientes de manera simultánea, buscando la mejor respuesta en el crecimiento y desarrollo. El presente enfoque, en el que se evalúa de manera separada la ausencia de cada nutriente, se ha quedado corto en la explicación de los verdaderos fenómenos que ocurren en la realidad y es por esto, que su capacidad de predicción ha sido mínima. Ahora se ha entendido que los sistemas complejos planta-suelo interactúan con una dinámica que exige la comprensión integral, en lugar del enfoque reduccionista con el que se ha venido abordando el tema (Ruffel *et ál.* 2010).

Elementos esenciales

Cada organismo es un sistema abierto conectado con su medio ambiente e influenciado por éste en un intercambio permanente de materia y energía. Las plantas aumentan su biomasa usando dióxido de carbono del aire, la energía del sol y los nutrientes que toman del suelo y del agua (Jones y Jacobsen 2001).

De acuerdo con las investigaciones realizadas durante el siglo pasado, en cultivos hidropónicos, con la técnica del Nutriente Faltante, existen más de 100 elementos químicos en la naturaleza, de los cuales solamente 17 se consideran esenciales para la vida de las plantas. Como producto de estas experimentaciones, diversos investigadores llegaron a la conclusión que sin estos “elementos esenciales” las plantas no pueden completar su ciclo de vida, pues estos elementos están

implicados directamente en funciones de crecimiento y reproducción y son vitales en la mayoría de las plantas para sobrevivir, además que son esenciales porque no pueden ser reemplazados por otros elementos para suplir sus funciones (Tabla 1). De los “elementos esenciales”, algunos se consideran no minerales, debido a que son tomados por la planta principalmente a partir del aire o del agua. Los otros nutrientes minerales se clasifican en macronutrientes y micronutrientes, dependiendo de la concentración en las plantas.

Dentro de los macronutrientes encontramos el nitrógeno (N), el fósforo (P), el potasio (K), el calcio (Ca), el magnesio (Mg) y el azufre (S). Por su parte, los micronutrientes incluyen el boro (B), el cloro (Cl), el cobre (Cu), el hierro (Fe), el manganeso (Mn), el molibdeno (Mo), el níquel (Ni) y el zinc (Zn) (Marschner 1995).

El nitrógeno, el fósforo, el potasio y el agua son considerados como los principales factores limitantes del crecimiento, el desarrollo, y finalmente del rendimiento económico de los cultivos (Parry *et ál.* 2005). Las respuestas de las plantas a la fertilización con N, P y K son de considerable importancia en la agricultura. A pesar que N, P y K con frecuencia limitan el crecimiento y desarrollo de varios cultivos, en condiciones de campo los mecanismos precisos por los cuales ocurre esa limitación son complejos y variables según la especie, etapa de desarrollo y el medio ambiente. Limitando el suministro de N, P y K se disminuye la tasa de división celular, la expansión celular, la permeabilidad celular (Hossain *et ál.* 2010), la fotosíntesis, la producción de hojas, el crecimiento (Chapin 1980; Clarkson y Hanson 1980; Evans 1972; Zhao *et ál.* 2003, 2005a, b), y el rendimiento. Algunos reportes sugieren que la deficiencia de N afecta con más fuerza el desarrollo de la hoja que la fotosíntesis, y que los efectos de bajo niveles de N, P y K en plantas causan bajas tasas de fotosíntesis y un lento proceso de expansión de la hoja (Hossain *et ál.* 2010).

Si la concentración de un elemento nutriente esencial en el tejido vegetal está por debajo del nivel necesario para un óptimo crecimiento, la planta es deficiente en ese elemento, lo que genera una alteración en la ruta metabólica en la que participa dicho elemento, afectando otros procesos involucrados. Por ejemplo, el suministro inadecuado de iones fosfato impide la exportación de triosas fosfatadas del cloroplasto y por ende la síntesis de sacarosa. Además,

el efecto de la nutrición con fósforo en la calidad del fruto puede atribuirse a su papel como componente de los fosfolípidos, que son los mayores constituyentes de la membrana celular (Knowles *et ál.* 2001).

Otros autores (Mengel y Kirkby 1987) han propuesto una clasificación de los elementos esenciales relacionada con la función fisiológica de los mismos dentro de la planta, teniendo en cuenta su desempeño bioquímico. Así, se han definido cuatro grandes grupos, en el grupo 1, se encuentran los elementos que hacen parte de compuestos orgánicos, como el Nitrógeno (N) y el Azufre (S). En el grupo 2, aparecen los elementos que son importantes en el almacenamiento de energía o en la integridad estructural, tales como el Fósforo (P), el Sílice (Si) y el Boro (B). En el grupo 3 los nutrientes que permanecen en su forma iónica, como el Potasio (K), el Calcio (Ca), el Magnesio (Mg), el Cloro (Cl), el Manganeso (Mn) y el Sodio (Na). Finalmente, en el grupo 4, se tienen los elementos que están involucrados en reacciones de oxido-reducción, como el Hierro (Fe), el Zinc (Zn), el Cobre (Cu), el Níquel (Ni) y el Molibdeno (Mo).

Movilización de Nutrientes

El conocimiento de la forma en que la planta absorbe los nutrientes, permite tener en cuenta aspectos importantes al momento de aplicar fertilizantes, como son consideraciones de solubilidad de los componentes, movilización de nutrientes en la planta y pH del medio, entre otros (Jones y Jacobsen 2001). La adecuada toma de nutrientes depende de dos factores fundamentalmente, de la capacidad de las raíces para absorber nutrientes y de la disponibilidad de los mismos en el medio.

Del medio a la planta. Las raíces se encuentran en contacto directo con algunos nutrientes; sin embargo, estos difícilmente pueden entrar a las células por difusión simple, aproximadamente sólo el 2,5% del total de nitrógeno, potasio y fósforo ingresan a la planta mediante este mecanismo (Foth y Ellis 1997). Por lo cual, la planta utiliza para lograr el movimiento de nutrientes hacia ella, el transporte activo y pasivo. Uno de los mecanismos más importantes se conoce como “Flujo en masa” y consiste en el ingreso de los nutrientes en forma

iónica, disueltos en el agua, debido al potencial hídrico generado por la transpiración de la planta; sin embargo, la eficiencia de este mecanismo está relacionada directamente con la movilidad de cada nutriente (Foth y Ellis 1997).

Dentro de la planta. Algunos nutrientes se movilizan dentro de la planta, desde la raíz hasta la zona en crecimiento. La movilidad puede ser alta, media o baja, y dependerá del tipo de planta y del estado fenológico en que se encuentre. Para condiciones óptimas los elementos móviles son nitrógeno, potasio, fósforo, magnesio, cloro, sodio, molibdeno, zinc, y los inmóviles son calcio, azufre, hierro, cobre y boro (Marschner 1995).

Se ha descubierto que algunos nutrientes pueden desplazarse desde hojas viejas a hojas más jóvenes si existe una deficiencia de nutrientes. Cloro, magnesio, molibdeno son de alta movilidad; en tanto que nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, boro, hierro y azufre se consideran nutrientes de intermedia a baja movilidad. Puede llegar a diagnosticarse la deficiencia de algún nutriente con la observación de síntomas en la planta. Por ejemplo, si el síntoma se observa en hojas superiores (más jóvenes), dado por la edad de la hoja, esto puede dar indicios que el suplemento que la planta necesita puede ser de alguno de los nutrientes menos móviles (Marschner 1995).

En el suelo. La movilidad de los nutrientes en el suelo es importante porque permite planificar su disponibilidad para las plantas. Este conocimiento influye en las decisiones de fertilización como dosis, frecuencia y tipo de fertilizante, así como del método de aplicación correcto. La movilidad de los nutrientes en el suelo en su forma iónica depende de su carga, y del pH, la temperatura y la humedad del suelo (Jones y Jacobsen 2001).

El siguiente cuadro (Tabla 1) resume las principales características de cada uno de los elementos esenciales y los síntomas de su deficiencia en las plantas:

Elemento	Función en la planta	Forma en que es principalmente absorbido	Síntomas de su deficiencia
Carbono	Constituyente de carbohidratos, proteínas y ácidos grasos. Indispensable en la fotosíntesis (Marschner 1995)	Se obtiene del aire (gas)	Generalmente no se presenta debido a la abundancia de CO ₂ en el aire. Sin embargo, en el caso de presentarse, su deficiencia limitaría el crecimiento y desarrollo vegetal (Marschner 1995).
Hidrógeno	Mantiene el balance osmótico, es importante en numerosas reacciones bioquímicas y hace parte de carbohidratos, proteínas y ácidos grasos (Marschner 1995).	Se obtiene del agua o de otros compuestos iónicos	No es un elemento limitante por su abundancia (Marschner 1995).
Oxígeno	Constituyente de carbohidratos, proteínas y ácidos grasos. Es requerido para la respiración (Marschner 1995).	Se obtiene del agua y del aire	Si el suministro de oxígeno se restringe, eventualmente los tejidos pueden morir. En el caso de raíces, la ausencia de oxígeno causa colores café y luego pudrición (Marschner 1995).
Nitrógeno	Constituyente de cada uno de los aminoácidos, es decir, presente en cada proteína. También hace parte de la molécula de clorofila y de los ácidos nucleicos. El nitrógeno estimula el crecimiento de tallos y hojas. Además estimula la producción de proteínas en frutas y granos, y ayuda a que la planta utilice otros nutrientes como fósforo y potasio (Kovacik <i>et ál.</i> 2007).	NO ₃ ⁻ y NH ₄ ⁺	Por su gran movilidad, los primeros síntomas se observan en hojas maduras. Su deficiencia causa falta de poder turgor y cambios de color en las hojas, las cuales primero se tornan verde claro, luego presentan clorosis y finalmente mueren; los sistemas radicales se ven reducidos (Suzuki <i>et al</i> , 2003). Otros síntomas que pueden presentarse son acumulación de compuestos fenólicos como flavonoides, antocianinas y cumarinas (Kovacik <i>et ál.</i> 2007)

Fósforo	<p>Constituyente de coenzimas, ácidos nucleicos y sustratos metabólicos.</p> <p>Hace parte del nucleótido más importante en la obtención de energía celular, el ATP.</p> <p>Promueve el desarrollo radical, y ayuda a desarrollar resistencia a enfermedades (Xiang-wen <i>et ál.</i> 2008)</p>	$H_2PO_4^-$ y HPO_4^{2-}	<p>Es uno de los nutrientes más limitantes en el crecimiento y desarrollo de la planta junto con el Nitrógeno.</p> <p>En general, hojas, tallos y peciolo maduros se observan de color verde oscuro o azulado o pueden ser morados. Las hojas pueden verse enrolladas. Las plantas tienen un desarrollo lento, la floración se demora, el sistema radical es pobre y las plantas son bastante susceptibles a infecciones.</p>
Potasio	<p>Importante en fotosíntesis, traslocación de carbohidratos y síntesis de proteínas.</p> <p>Es un catalizador o activador de ciertas enzimas, participa en la osmorregulación y también en el mantenimiento del potencial de membrana (Pyo <i>et ál.</i> 2010).</p> <p>Implicado en el control del turgor de las células guarda estomáticas (Gierth y Mäser 2007).</p>	K^+	<p>En su ausencia, inicialmente se observa en las hojas maduras clorosis marginal e intervenal, enrollamientos, hojas arrugadas y brotes muy cortos.</p> <p>En general, la planta con déficit de potasio se observa débil, con un sistema radical pobre, y con muy baja tolerancia a situaciones de estrés o ataques de enfermedades.</p> <p>La deficiencia estomática implica reducción de las tasas de transpiración e intercambio de gases (Gierth y Mäser 2007)</p>
Calcio	<p>Hace parte de las paredes celulares, tiene una función importante en la estructura y permeabilidad de las membranas.</p> <p>Es un activador de las enzimas amilasa y ATPasa.</p> <p>En árboles, el contenido de Calcio está relacionado con la calidad y resistencia de la madera (Littke y Zabowaki 2007)</p>	Ca^{2+}	<p>Los síntomas de su deficiencia se observan inicialmente en hojas jóvenes dado su baja movilidad.</p> <p>En general, se observan meristemas apicales deformados, pequeños o sin crecimiento; las yemas en forma de gancho, los brotes del tallo o de flores se caen y en las hojas maduras se</p>

			presenta clorosis marginal y pérdida de turgor (Littke y Zabowaki 2007).
Magnesio	Es el componente principal de la clorofila. Combinado con ATP o ADP actúa como activador de enzimas que usan dos sustratos (Marschner 1995).	Mg^{2+}	Cuando este elemento se encuentra en bajas concentraciones, la producción de clorofila disminuye, lo que se traduce en clorosis intervenal y finalmente necrosis. En las hojas maduras se presentan primero los síntomas, ellas se tornan quebradizas y enrolladas (Marschner 1995).
Azufre	Es parte integral de los aminoácidos cisteína y metionina. Constituye parte importante de los puentes disulfuro, y por tanto de la conformación de la estructura de las proteínas (Marschner 1995).	SO_4^{2-}	Un descenso en el contenido de azufre causa reducción en la síntesis de proteínas y de todas las moléculas que dependen de este elemento. Así, las hojas jóvenes presentan clorosis, las raíces y los tallos diámetros menores a los normales, pero de mayor longitud. En general, un sistema radical débil pero invasivo y tallos rígidos y quebradizos (Marschner 1995).
Boro	Importante en la translocación de azúcares y carbohidratos. Sus funciones principales se relacionan con el normal desarrollo de la pared celular, la división celular y el desarrollo de frutas y semillas (Marschner 1995).	H_3BO_3 y $H_2BO_3^-$	Su deficiencia causa tallos y peciolo quebradizos, con crecimiento anormal y de color blanquecino. Las hojas jóvenes se presentan primero delgadas y curvadas. El programa reproductivo se ve retrasado o inhibido, y si hay frutos, éstos debido a la deficiencia se pudren con facilidad (Marschner 1995)

Cloro	Está implicado en el mantenimiento del turgor y el crecimiento de las células en situaciones de estrés hídrico (Marschner 1995).	Cl ⁻	Las hojas más maduras se vuelven cloróticas y finalmente necróticas, con un área foliar reducida. Es común el marchitamiento y el atrofiamiento del crecimiento de la planta, además de una reducción en la tasa de transpiración (Marschner 1995).
Cobre	Está implicado en la síntesis de clorofila. Es constituyente de la plastocianina, que funciona en la transferencia de electrones y de proteínas con actividad oxidasa. Está implicado en la síntesis de ADN y ARN (Marschner 1995).	Cu ²⁺	Los síntomas de su deficiencia incluyen acortamiento de entrenudos, hojas nuevas que crecen atrofiadas, enanas o retorcidas, débiles y de color verde oscuro, con puntos necróticos. El sistema radical también se presenta atrofiado, y la floración y fructificación se reducen dramáticamente (Marschner 1995).
Hierro	Es un catalizador involucrado en la activación de enzimas necesarias en las reacciones de oxido-reducción y transferencia de electrones y actúa como transportador de oxígeno. Además actúa como cofactor en la síntesis de clorofila y en el correcto funcionamiento de otras enzimas importantes como catalasa, peroxidasa, ferredoxina y citocromos (Marschner 1995).	Fe ²⁺ y Fe ³⁺	Los primeros síntomas incluyen clorosis intervenal y amarillamiento o blanqueamiento de las láminas foliares de las hojas jóvenes. En casos de deficiencia severa, se observan manchas angulares café intervenales y en los márgenes de las hojas un color café oscuro con una apariencia de quemadura. Estos síntomas pueden presentarse en una rama o en la planta entera (Marschner 1995).

Manganeso	Está implicado en la activación de enzimas que son catalizadores importantes de la reducción de carbohidratos, formación de clorofilas, y síntesis de DNA y RNA. Está directamente implicado en la producción de oxígeno durante la fotosíntesis (Shenker <i>et ál.</i> 2004).	Mn^{2+}	La clorosis intervenal es evidente y similar a la observada en deficiencia de magnesio, zinc o hierro. En casos severos, se presentan puntos necróticos y caída de hojas; la formación de flores se reduce o se detiene (Shenker <i>et ál.</i> 2004).
Molibdeno	Está implicado en la fijación de nitrógeno, en la transformación de nitrato a amonio, y en el metabolismo de carbohidratos (Marschner 1995).	MoO_4^{2-}	La clorosis intervenal, que se presenta por esta deficiencia, suele confundirse con la producida por bajos niveles de nitrógeno, adicionalmente se observan manchas y algunas veces enrollamientos en los bordes de las hojas (Marschner 1995).
Zinc	Este elemento es un activador de enzimas que están implicadas en la regulación de varios procesos metabólicos, como la síntesis de DNA, RNA, proteínas, algunas hormonas (Kalaycia <i>et ál.</i> 1999)	Zn^{2+}	En general, los síntomas incluyen un crecimiento atrofiado y acortamiento de entrenudos. Las hojas se tornan amarillas o cafés, típicamente otoñales y con menor área foliar. El sistema radical presenta anormalidades, así como los tallos. Las deficiencias de Zinc pueden inducir elevados niveles de fósforo, nitrógeno, cobre o hierro (Kalaycia <i>et ál.</i> 1999).

Para el estudio de los síntomas debidos a la deficiencia de alguno de los nutrientes esenciales, en cualquier especie vegetal, se puede utilizar la técnica de crecimiento en hidropónico, en el que las plantas crecen en una solución nutritiva la cual se debe mantener aireada. Esta solución generalmente es un medio líquido modificado a partir del formulado por Dennis R. Hoagland. La solución Hoagland modificada

contiene todos los nutrientes esenciales y puede prepararse sin alguno de ellos para determinar el efecto de su deficiencia sobre el crecimiento de la planta (Taiz y Zeiger 2006).

Algunos fisiólogos como Jones (1982) consideran, que para estudios de deficiencia de nutrientes se realice el cultivo sobre sustrato arena de río y adicionando solución Hoagland debido a que bajo ese sistema de crecimiento la raíz tiene soporte y tendrá buena aireación, lo que favorecerá el crecimiento de la planta. Además, esta técnica evita varios problemas que aparecen en los cultivos en solución como, por ejemplo, la necesidad de sustituir o complementar la solución cada pocos días, y los cambios en la composición de la solución debido a que ciertos iones se absorben más rápidamente generando cambios indeseables en el pH (Cooper 1979; Graves 1983; Jones 1983; Resh 1989). Esta modificación no altera en lo absoluto la respuesta, que en términos de deficiencia y contenido mineral foliar, se espera obtener de un ensayo totalmente hidropónico y por el contrario, favorece el crecimiento de las plantas evitando factores indeseables (Salisbury y Ross 2000).

Fase experimental

El resultado del análisis de diferentes partes de la planta varía considerablemente. Generalmente, la hoja es el órgano más útil para diagnóstico, por su marcada variación en composición de acuerdo con los diferentes niveles de fertilidad. El Plant Analysis Handbook establece que la edad fisiológica del tejido y la posición dentro de la planta son determinantes, por ello si se desconocen las instrucciones de muestreo para un cultivo en particular, la regla general establece la colecta de hojas maduras bien desarrolladas al inicio de la fase reproductiva de la planta.

Ensayo 1. Técnica del nutriente faltante

Materiales

Material biológico: plantas de interés a evaluar, con registro de inicio de germinación y condiciones de siembra conocidas.

Otros materiales: frascos oscuros con capacidad para un galón (solución matriz), 27 frascos con capacidad de 500 mL, pipetas de 10 mL para cada una de las soluciones. Cascarilla y escoria. Vasos o materas y platos plásticos.

Reactivos: Soluciones nutritivas (Tabla 2)

Equipos: pH-metro, estufa con aire caliente circulante, plancha agitadora, termómetro ambiental, higrómetro, cuaderno de laboratorio o campo.

Metodología

Nutrientes: Preparar soluciones stock tal como lo indica la tabla 2.

Tabla 2. Soluciones stock para el uso en el estudio de la sintomatología en plantas debida al déficit de algún nutriente (método del nutriente faltante).

Símbolo	Compuesto	Concentración
A	Ca (NO ₃) ₂ .4 H ₂ O	1 M (236 g/L)
B	KNO ₃	1 M (101 g/L)
C	MgSO ₄ .7 H ₂ O	1 M (246,5 g/L)
D	KH ₂ PO ₄	1 M (136 g/L)
E	Quelato de Fe (FeSO ₄ + Na ₂ EDTA)	5 g/L de Fe
F	Micronutrientes	1,81 g MnCl ₂ .4H ₂ O+ 2,86 g H ₃ BO ₃ + 0,22 g ZnSO ₄ .7H ₂ O+ 0,09 g H ₂ MoO ₄ + 0,88 g CuSO ₄ .5H ₂ O en 1 L de agua destilada)
G	NaNO ₃	1 M (85,01 g/L)
H	MgCl ₂	1 M (95,23 g/L)
I	Na ₂ SO ₄	1 M (142,06 g/L)
J	NaH ₂ PO ₄ .H ₂ O	1 M (138,01 g/L)
K	CaCl ₂	1 M (110,99 g/L)
L	KCl	1 M (74,55 g/L)

M=Molaridad (gramos de sal por litro de solución); ppm: partes por millón (número de partes de la sal en un millón de partes de solución).

Fe EDTA: en un vaso de precipitado disolver 5 g de $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ en 200 mL de agua destilada; en otro vaso disolver 7,45 g de Na_2 EDTA en 200 mL de agua destilada caliente (50°C). Posteriormente mezclar las dos soluciones, agitar, dejar enfriar y completar a volumen final de 1 L.

Posteriormente adicionar volúmenes específicos a partir de las soluciones stock (mL), como se indica en la tabla 3, y agitar cada vez se agregue un reactivo. Llevar a volumen final de 250 mL.

Tabla 3. Soluciones nutritivas con nutriente faltante

Solución	Completa	-Ca	-S	-Mg	-K	-N	-P	-Micro Nutriente
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	2,5	-	2,5	2,5	2,5	-	2,5	2,5
KNO_3	2,5	2,5	2,5	2,5	-	-	2,5	2,5
MgSO_4	1,0	1,0	-	-	1,0	1,0	1,0	1,0
KH_2PO_4	0,5	0,5	0,5	0,5	-	0,5	-	0,5
Fe-EDTA	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Micronutrientes	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	-
NaNO_3	-	5,0	-	-	-	-	-	-
MgCl_2	-	-	1,0	-	-	-	-	-
Na_2SO_4	-	-	-	1,0	-	-	-	-
NaH_2PO_4	-	-	-	-	0,5	-	-	-
CaCl_2	-	-	-	-	-	2,5	-	-
KCl	-	-	-	-	-	2,5	0,5	-

Siembra y mantenimiento del material vegetal: Mezclar en un recipiente grande la cascarilla con la escoria en proporciones iguales, homogenizando completamente la mezcla, y posteriormente disponer en vasos o materas que tengan tres orificios en el fondo, llenar hasta el borde de cada vaso y colocarlo sobre un plato desechable.

Disponer de 35 plántulas con seis hojas verdaderas, de la especie a evaluar, previamente sembradas en un sustrato arena o cascarilla-escoria, lo más uniformes

posibles y sin presencia de semilla. Después de humedecer bien, retirarlas con cuidado del matero donde se encontraban creciendo. Lavar con agua las raíces. Utilizando un lápiz, hacer un hueco de unos 4 cm de profundidad, en el sustrato añadido a las materas o vasos e introducir la plántula con todo el cuidado posible. Adicionalmente, medir a tres plantas similares, la longitud del vástago y de la raíz, la biomasa fresca y seca total, y el área foliar. A otras plantas del mismo lote, determinarles longitud, masa fresca, y disectarlas separando la raíz, el tallo, y las hojas para determinar la masa fresca y seca de cada órgano. Para cada variable, calcular el promedio y utilizar estos valores como registro inicial para todas las plantas. Las plantas deben ser regadas diariamente luego de la siembra y por espacio de 1-2 meses dependiendo de la especie a evaluar con una solución completa en dilución 1:5 (4 partes de agua por una parte de la solución completa). Posteriormente colocar los vasos en completo orden y debidamente marcados sobre un mesón del invernadero, regar cada una de las plantas con 100 mL de la solución correspondiente (Tabla 3), dejar drenar y utilizar la solución para los riegos posteriores. Este procedimiento se debe repetir cada dos días durante el tiempo del ensayo y dependiendo de la especie. A intervalos de dos veces por semana, cuando no haya drenaje sobre el plato, reemplazar la solución por agua destilada.

VARIABLES A EVALUAR: diariamente a la misma hora registrar la temperatura máxima, la temperatura mínima y la humedad relativa dentro del invernadero. A intervalos de ocho días y durante dos meses registrar la longitud del vástago de cada planta y el estado general (color y aspecto externo). Observar las hojas y registrar la presencia de manchas necróticas o cloróticas; entorchamientos y ondulaciones en el ápice, en los bordes, en la base o en la margen; clorosis intervenal; necrosis apical. Tomar registro fotográfico. Luego de dos meses retirar, con mucho cuidado, el material vegetal de los vasos o materas, lavar las raíces suavemente con agua, medir la longitud de vástago y raíz, el área foliar, describir la arquitectura de la raíz y los síntomas que se evidencien en los diferentes órganos. Determinar masa fresca y seca en hojas y raíz. Tabular y graficar las variables evaluadas. Analizar y discutir los resultados. Incluir un análisis de varianza para determinar si hay diferencias estadísticas entre los tratamientos.

Ejemplo caso de estudio

Sintomatología de deficiencias nutricionales en plantas de Arazá (*Eugenia stipitata*) (Barrera *et ál.* 2009). Se partió de soluciones nutritivas Hoagland y Arnon (1950). Para el estudio en arazá se prepararon soluciones stock y a partir de ellas las soluciones a utilizar en el ensayo, utilizando el método del nutriente faltante. Las plantas fueron establecidas en casa de malla en materas de 2 kg de capacidad sobre sustrato de arena de río previamente lavada. Las plantas fueron regadas diariamente luego de la siembra y por espacio de dos meses con una solución completa en dilución 1:5 (4 partes de agua por una parte de solución completa) para aclimatarlas. Pasado este tiempo las plantas fueron sometidas a los tratamientos con las diferentes soluciones de nutriente faltante, aplicando estas mediante un riego diario. Es decir, las plantas se regaban las plantas con el volumen establecido de cada solución diariamente en la mañana, reincorporando en la tarde el filtrado recogido en el plato. Se tomó como unidad experimental una matera, destinando para cada tratamiento tres materas. Luego de seis meses del ensayo se colectaron las plantas y sobre las hojas maduras se fotografiaron los síntomas de deficiencia y se determinaron los contenidos de nutrientes minerales (Tabla 4, Figura 1)

Tabla 4. Contenidos medios en % de 6 elementos minerales en hojas de plantas de Arazá crecidas en solución Hoagland con déficit mineral. n=3.

Tratamiento	% N	% P	% K	%Ca	% Mg	% S	Masa seca en hojas (g)
Completa	2,39	0,25	0,99	0,65	0,32	0,21	6,7
-N	1,04	0,2	0,7	0,55	0,35	0,16	1,7
-P	1,91	0,11	0,89	0,44	0,29	0,14	3,0
-K	1,91	0,31	0,38	0,5	0,32	0,12	2,3
-Ca	1,39	0,25	0,86	0,32	0,41	0,15	3,7
-S	2,31	0,3	0,92	0,6	0,33	0,12	3,0
-Mg	1,47	0,28	0,82	0,83	0,25	0,09	7,0

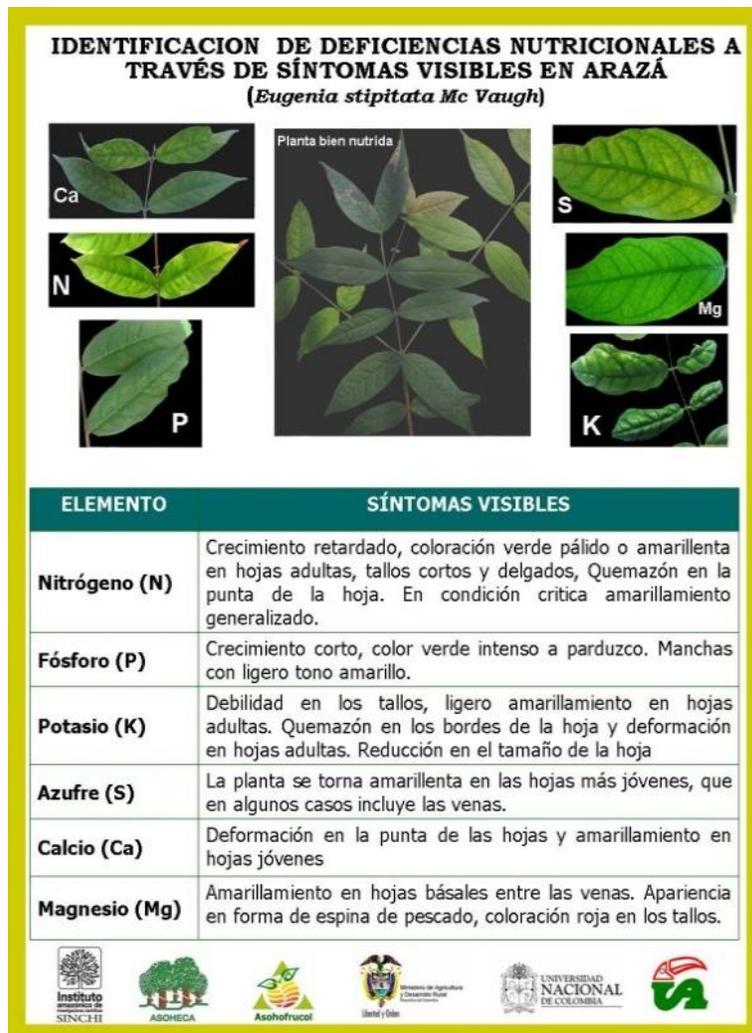


Figura 1. Síntomas de deficiencia de 6 minerales en plantas de Arazá desarrolladas bajo solución Hoagland (Barrera *et ál.* 2009)

Ensayo 2. Interpretación de análisis foliar y de suelos

La interpretación de un análisis foliar o de suelo se basa en la comparación de la concentración del elemento, determinada por el laboratorio, frente a una amplia suficiencia del mismo. La concentración de cada elemento analizado se registra entonces como menor, mayor que, o dentro del rango de suficiencia. Los rangos de suficiencia de una planta se determinan valorando en laboratorio la concentración de nutrientes y la masa fresca y seca de cada órgano a la cosecha. Con estos resultados se determina la masa total de nutrientes extraídos por la planta durante una cosecha. Este valor corresponde al umbral de extracción de nutrientes para un rendimiento determinado y constituye el rango de suficiencia que sirve de punto de comparación.

En la evaluación de la fertilidad del suelo el método más práctico es el del análisis químico del suelo, el cual es una herramienta importante para identificar, no solamente la dosis del fertilizante, sino el plan de fertilización más apropiado para cada caso. La identificación del nivel de fertilización como resultado del diagnóstico de la fertilidad se logra mediante la interpretación del análisis, la cual debe ser realizada por un Ingeniero Agrónomo capacitado y con base en los criterios desarrollados para cada cultivo por los programas de investigación.

Material

Análisis de suelos y de tejido foliar obtenidos en laboratorio certificado.

Metodología

Identificar en el *Plant Analysis Handbook* (<http://aesl.ces.uga.edu/publications/plant/>) el rango de suficiencia para cada elemento según el cultivo o especie a que corresponda. Tomar los resultados del análisis foliar y completar la tabla 5. Comparar los valores obtenidos en el laboratorio con el rango de suficiencia reportado y otorgar la calificación respectiva. Una interpretación del análisis de plantas, suelos o aguas se basa en la comparación de la concentración del elemento encontrada, contra un rango de suficiencia. La concentración de cada elemento analizado es reportada como menos que, más que o dentro del rango de suficiencia. Con esta herramienta se puede complementar el programa de fertilización que genera el análisis de suelos, debido a que permite explicar por qué un elemento está por fuera del rango de suficiencia y dar un tratamiento correctivo.

Tabla 5. Formato para interpretación del análisis foliar

	Porcentaje (%)					ppm				
	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn	B
Análisis foliar										
Rango de Suficiencia										
Calificación										

Calificación: E: Exceso, NA: Nivel adecuado, D: Déficit

Utilizar la tabla de consideraciones generales para interpretar análisis de suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC (Tabla 6).

Tabla 6. Consideraciones generales para interpretar análisis de suelos



INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI
SUBDIRECCIÓN DE AGROLOGÍA
CONSIDERACIONES GENERALES PARA INTERPRETAR ANÁLISIS DE SUELOS

pH (H ₂ O)	APRECIACIÓN	P	K	%M.O			%N.Total			CIC	SATURACIÓN DE	
		ppm	meq/100g	CLIMA			CLIMA			meq/100g	BASES (SB)	
1:1		(BRAY II)		FRÍO	MEDIO	CÁLIDO	FRÍO	MEDIO	CÁLIDO		%	
<4.5	BAJO	<15	<0.2	<5	<3	<2	<0.25	<0.15	<0.1	<10	<35	
EXTREMADAMENTE ÁCIDO	MEDIO	15 - 40	0.2 - 0.4	5 - 10	3 - 5	2 - 4	0.26 - 0.5	0.16 - 0.3	0.1 - 0.2	10 - 20	35 - 50	
4.6 - 5.0	ALTO	>40	>0.4	>10	>5	>4	>0.5	>0.3	>0.2	>20	>50	
MUY FUERTEMENTE ÁCIDO	APRECIACIÓN	RELACIONES			CLASIFICACIÓN DE ACUERDO			S.A.I % (SATURACIÓN DE ALUMINIO)		APRECIACIÓN		
5.1 - 5.5		Ca/Mg	Mg/K	Ca/K	(Ca+Mg)/K	CON SALES Y SODIO						
FUERTEMENTE ÁCIDO	RELACIÓN IDEAL	2 - 4	3	6	10	ce mmohs/cm (dS/m)	PSI	CLASE			SIN PROBLEMAS EN GENERAL	
5.6 - 6.0									<15		LIMITANTE PARA	
MEDIANAMENTE ÁCIDO	K DEFICIENTE		>18	>30	>40	0 - 2		NORMAL			CULTIVOS SUSCEPTIBLES	
6.1 - 6.5						2 - 4	INFERIOR	LIMITE			LIMITANTE PARA	
LIGERAMENTE ACIDO	Mg DEFICIENTE	>10	<1			4 - 8	A	S1	15 A 30		CULTIVOS MODERADAMENTE	
6.6 - 7.3						8 - 16	15%	S2			TOLERANTES	
NEUTRO	CONTENIDO OPTIMO	ELEMENTOS MENORES* (ppm)				>16		S3			LIMITANTE PARA CULTIVOS TOLERANTES	
7.4 - 7.8		Zn	Cu	Mn	Fe	0 - 4		Na	30 A 60			
LIGERAMENTE ALCALINO	SUELO	3 - 6	1.5 - 3	15 - 30	20 - 30	4 - 8	SUPERIOR	NaS1				
7.9 - 8.4						8 - 16	A	NaS2			NIVELES TÓXICOS	
MEDIANAMENTE ALCALINO	PLANTA	30 - 100	5 - 25	30 - 200	60 - 500	>16	15%	NaS3	>60		PARA LA MAYORÍA	
8.5 - 9.0											DE CULTIVOS	
FUERTEMENTE ALCALINO	*Extractables con DTPA en suelos; digestión húmeda en tejido vegetal.							INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI				
>9.0	Boro en suelos (extractable en agua caliente): 0.6 - 1.0 ppm.							LABORATORIO DE SUELOS				
EXTREMADAMENTE ALCALINO	Boro en tejido vegetal : 30-80 ppm.							AREA DE QUÍMICA				

NC(Nivel Crítico): 25 ppm NO₃; 20 ppm NH₄; NC: 0.2 ppm B(Fosfato de Calcio); NC: 12 ppm P (Olsen modificado); NC: 20 ppm S disponible (Fosfato de calcio)

CONCENTRACION NORMAL EN TEJIDO VEGETAL (Handbook of Reference Methods for Plant Analysis, 1998):

N (%): 2,5-4,5; P (%): 0,2-0,75; K (%): 1,5-5,5; Ca (%): 1,0-4,0; Mg (%): 0,25-1,0; S (%): 0,25-1,0

B (ppm): 10-200; Cu (ppm): 5-30; Fe (ppm): 100-500; Mn (ppm): 20-300; Zn (ppm): 27-100; Mo(ppm): 0.1-0.2; Cl (ppm): 100-500

Con esta guía consolidar los resultados en la tabla 7:

Tabla 7. Interpretación del análisis de suelos

ELEMENTO	RESULTADO	ANÁLISIS
pH		
Saturación de Aluminio) S.A.I		
Elementos mayores		
Nitrógeno (N)		
Fósforo (P)		
Potasio (K)		
Calcio (Ca)		
Magnesio (Mg)		
Sodio (Na)		
Elementos menores		
Manganeso (Mn)		
Hierro (Fe)		
Zinc (Zn)		
Cobre (Cu)		
Relaciones catiónicas		
Ca/Mg		
Mg/K		
Ca/K		

Formulación de recomendaciones de fertilización

Como una guía para la formulación de recomendaciones para la aplicación de fertilizantes y de enmiendas se sugiere seguir las pautas que se relacionan a continuación:

- a) Establecer la disponibilidad de nutrientes en el suelo usando las categorías reseñadas en la tabla anterior.
- b) Calcular el peso de la hectárea de suelo, con base en el valor de la densidad aparente (g cm^{-3}) que varía según la textura, y la profundidad de raíces de las especies (cm).
- c) Con los resultados del análisis de suelos, hacer la conversión de los nutrientes del suelo a kg ha^{-1} .
- d) Determinar las cantidades de nutrientes a aplicar (diferencia entre las necesidades de la especie y los nutrientes disponibles en el suelo; con ello se corrigen las deficiencias y se ajustan los desbalances entre los nutrientes).
- e) Seleccionar el tipo de fertilizantes a usar y calcular las cantidades a aplicar en kg ha^{-1} . Se debe tener en cuenta la eficiencia del uso de nutrientes de los fertilizantes por la planta, la aplicación, y la concentración de nutrientes en cada fórmula del fertilizante.

Unidades y fórmulas usadas en las recomendaciones de fertilización: Para convertir estas unidades a kg ha^{-1} es necesario, conocer el peso de la hectárea de la capa arable, este peso depende de la densidad aparente del suelo y de la profundidad de raíces, que para la mayoría de especies de crecimiento erecto es de 10-15 cm y para las de crecimiento prostrado es de 15-20 cm. En árboles frutales se considera una profundidad efectiva de 30 cm.

Para calcular el peso de una hectárea se aplica la siguiente fórmula:

$$P(\text{ha}) = 100.000 \times Pr \times \rho_b$$

Donde:

$P(\text{ha})$ = peso de una hectárea en kg.

100.000 = constante

Pr = profundidad de raíces del cultivo en cm

ρ_b = Densidad aparente del suelo g cm^{-3}

Para aplicar la constante (100.000) se tiene en cuenta la siguiente relación matemática:

$$\text{Densidad aparente } (\rho_b) = \frac{\text{Masa seca del suelo en g (P)}}{\text{volumen del suelo en cm}^3 \text{ (V)}}$$

V = profundidad en cm x el área de 1 ha de suelo (100.000.000 cm²)

$$V = 1 \text{ cm} \times 100.000.000 \text{ cm}^2 = 100.000.000 \text{ cm}^3$$

Para usar 100.000 como constante, se asume una profundidad de 1 cm en la fórmula inicial y posteriormente se multiplica este resultado por la profundidad real de las raíces de la especie. De donde: Peso de 1 ha en kg = 100.000 x Profundidad del suelo (cm) x ρ_b (g cm⁻³)

$$\text{Peso de una hectárea} = 100.000.000 \text{ cm}^3 \times \frac{1 \text{ g}}{1 \text{ cm}^3} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} = 100000 \text{ kg}$$

Cálculos a partir de los datos registrados en el análisis de suelo a kgxha⁻¹

1. Conversión de ppm a kg ha⁻¹ del nutriente:

Por definición, partes por millón es el equivalente entre el peso de una hectárea en kilos dividido por un millón de kilos. Este valor se multiplica por el valor en ppm de los siguientes elementos reportados por el laboratorio: fósforo, azufre y elementos menores (hierro, cobre, manganeso, zinc y boro).

$$\text{kilogramos por hectárea} = P(\text{ha}) \times \text{ppm del nutriente}$$

ppm = partes por millón = relación 1 en 1.000.000 ó 1/1.000.000

2. Conversión de Porcentaje del nutriente a kg ha⁻¹; el cual solo se aplica en el caso de nitrógeno asimilable.

Conversión de porcentaje a kg ha⁻¹, de nitrógeno asimilable:

i) calcular el Nitrógeno total (%), el cual equivale a la cantidad de materia orgánica MO del suelo dividida por 20. Veinte es una constante (por definición, de 100 partes de MO en el suelo, 20 corresponden al N total).

%MO= %CO x 1,724 (factor de Van Bemmelen el cual considera que la materia orgánica contiene en promedio 58% de carbono.

$$\%N \text{ total} = \% MO / 20$$

ii) calcular el N asimilable (NA)

N asimilable (%) = %N total (0,015)

El nitrógeno del suelo tiene dos componentes, N orgánico y N inorgánico. Los microorganismos del suelo hacen la conversión de la forma orgánica a inorgánica, que es la que absorben las plantas. Se estima que entre 1,5% y 3,0% del N total del suelo corresponde a N inorgánico; usualmente se trabaja con 1,5% ó (0,015).

La cantidad de N por hectárea equivale a NA (%), multiplicada por el peso de una hectárea, dividido por 100.

$$\text{kg / ha de N} = \text{N asimilable (\%)} \times \text{P(ha)}/100$$

iii) Realizar conversión de miliequivalentes (meq) a kg ha^{-1} del nutriente.

Para esta conversión se debe tener en cuenta el peso atómico y la valencia del elemento, al igual que la densidad aparente y la profundidad de las raíces de la especie. Para el cálculo de la cantidad de kilos/ha del elemento, se aplica la siguiente fórmula:

$$\frac{\text{kg}}{\text{ha}} = \left(\frac{\text{Pa}}{\text{va}} \right) \times \rho b \times \text{Pr} \times \frac{\text{meq}}{100 \text{ g de suelo}}$$

Donde:

Pa = Peso atómico de los elementos (K =39, Ca=40 y Mg=24).

(va) = Valencia de los elementos (K=1, Ca=2 y Mg=2).

ρb = Densidad aparente en g cm^{-3}

Pr = profundidad de raíces en cm

meq/100 g de suelo = Resultado del análisis de suelo reportado por el laboratorio

En la actualidad, la mayoría de los países expresan los contenidos nutricionales de los abonos en términos de nitrógeno elemental (N), pentóxido de fósforo (P_2O_5) y óxido de potasio (K_2O). Los elementos secundarios y los microelementos se expresan usualmente en términos de base elemental; sin embargo, el calcio y el

magnesio son expresados algunas veces como óxidos. En el ámbito científico, se tiende a utilizar la expresión elemental para todos los nutrientes. En la Tabla 8 se recopilan los factores que deben aplicarse para convertir los contenidos nutricionales de la base elemental a la de óxido. Este tipo de conversión es utilizado con frecuencia para los cálculos requeridos en la práctica de la fertilización.

Tabla 8. Balance general de nutrientes para el cultivo

ELEMENTO	RESULTADO EN kg ha ⁻¹	ABSORCIÓN DE NUTRIENTES EN kg ha ⁻¹	DIFERENCIA	FACTOR DE CONVERSIÓN	DOSIS A APLICAR EN kg ha ⁻¹
Elementos mayores					
Nitrógeno (N)					
Fósforo (P)				2,2910 P ₂ O ₅	
Potasio (K)				1,2046 K ₂ O	
Calcio (Ca)				1,3992 CaO	
Magnesio (Mg)				1,6581 MgO	
Sodio (Na)				1,3479 Na ₂ O	
Elementos menores					
Manganeso (Mn)				1,2912 MnO	
Hierro (Fe)				1,4297 Fe ₂ O ₃	
Zinc (Zn)				1,2447 ZnO	
Cobre (Cu)				1,2517 CuO	
Boro (B)				3,2196 B ₂ O ₃	

Los niveles de absorción de nutrientes se pueden consultar en la literatura.

No todo el nutrimento aplicado en el fertilizante es aprovechado por el cultivo, pues solamente una proporción del mismo es utilizado por la planta. A esta proporción, que generalmente es expresada en porcentaje, se le denomina eficiencia del uso de nutrientes minerales de los fertilizantes. Dependiendo de las condiciones del suelo y de las condiciones climáticas, una parte de los nutrientes aplicados en la fertilización

se perderán del sistema suelo-raíz quedando fuera de la acción absorbente de la planta, debido a la ocurrencia de los siguientes procesos: Fijación, lixiviación, inmovilización, volatilización, desnitrificación, acomplejamiento, escorrentía y erosión.

Ejemplo caso de estudio

Interpretación de análisis de suelos y foliar en arazá (*Eugenia stipitata* Mc Vaugh).

El arazá (*Eugenia stipitata*) es una especie frutal tipo arbusto originario de la región amazónica. Actualmente se cultiva en la Amazonia colombiana como componente medio de los sistemas agroforestales, con caucho y maderables. De esta especie se desconoce gran parte de los aspectos nutricionales, razón por la cual se realizó el estudio en mención. En el departamento de Caquetá, municipio de Albania sobre una plantación de arazá bajo arreglo agroforestal con caucho de seis años de edad, se tomaron muestras de 20 hojas maduras por cada una de las 12 plantas asignadas a un ensayo de uso de diversas fuentes de fertilización orgánica. Los datos del análisis foliar corresponden a plantas testigo sin fertilización alguna (Tabla 9). Los rangos de suficiencia se obtienen de los contenidos reportados en la tabla 4 para plantas de arazá bajo solución nutritiva completa. El análisis de suelos corresponde al sitio donde se desarrolla el estudio.

Tabla 9. Interpretación del análisis foliar de plantas de seis años de arazá bajo arreglo agroforestal

	Porcentaje (%)				
	N	P	K	Ca	Mg
Análisis foliar	1,44	0,11	5,37	0,76	0,10
Rango de Suficiencia	1,88-2,53	0,23-0,30	0,69-1,36	0,53-0,76	0,27-0,40
Calificación	D	D	E	NA	D

Calificación: E: Exceso, NA: Nivel adecuado, D: Déficit

Se interpreta que las plantas de arazá bajo arreglo agroforestal sin fertilización alguna presentan niveles deficientes de Nitrógeno, Fósforo y Magnesio, niveles altos de Potasio y adecuados de Calcio.

El análisis de suelos se reporta en la tabla 10.

Tabla 10. Análisis de suelos. Cultivo de arazá asociado con caucho. Municipio de Albania-Caquetá

Parámetro	Valor	Interpretación
Textura	Ar	Arcilloso
pH	4,2	Extremadamente ácido
Saturación de aluminio %	82,7	Niveles tóxicos para la mayoría de los cultivos
Concentración de CO %	2,1	Deficiente
CIC meq/100 g	16,6	<10 bajo 10-20 medio
Saturación de bases %	4,6	<35% bajo
Fósforo intercambiable ppm	0,79	Bajo
Calcio meq/100 g	0,29	
Magnesio meq/100 g	0,26	
Potasio meq/100 g	0,34	<0,2 bajo 0,2-0,4 medio
Ca/Mg	1,11	Adecuada no ideal
Mg/K	0,76	Magnesio deficiente
Ca/K	0,85	No ideal

La interpretación (basándose en condiciones generales para interpretar los análisis de suelos según el formato del IGAC) sugiere que elementos como el fósforo y el magnesio son los más deficientes en este suelo y deben ser considerados en la recomendación de fertilización. El nitrógeno, aunque su nivel en hojas no es bajo y en suelos se encuentra en nivel medio, debe considerarse en la recomendación por la importancia de este elemento en la nutrición del cultivo. Dado que la especie está adaptada a condiciones de suelos con alta saturación de aluminio, este parámetro no se considera limitante para su desarrollo; sin embargo, las condiciones de saturación de bases tan bajas permiten una adición de enmiendas ricas en calcio y magnesio que favorecerán un pH más alto, mejor disponibilidad de nutrientes como el fósforo y mejores relaciones en las bases de cambio.

Para efectuar una adecuada recomendación el primer paso es determinar los contenidos en kg ha⁻¹ de los elementos. Para este ejemplo se determinan los

contenidos de los elementos considerados deficientes o de aplicación necesaria, a saber: Nitrógeno, Fósforo y Magnesio. Los cálculos se realizan siguiendo la ruta mencionada en el ítem de formulación, considerando una densidad aparente de $1,2 \text{ g cm}^{-3}$ y una profundidad de raíces de 30 cm:

Peso de una hectárea: $100.000 \text{ kg} \times 1,2 \text{ g cm}^{-3} \times 30 \text{ cm}$

Peso de una hectárea: $3.600.000 \text{ kg} = 3600 \text{ Ton}$

I. Nitrógeno

$\% \text{MO} = 2,1\% \times 1,724$

$\% \text{MO} = 3,62\%$

$\% \text{N total} = 3,62\% / 20$

$\% \text{N total} = 0,181\%$

$\% \text{N asimilable} = 0,181\% \times 0,015$

$\% \text{N asimilable} = 0,0027153\%$

$\text{N por hectárea} = 0,0027153 \times 3.600.000 \text{ kg} \div 100$

$\text{N por hectárea} = 97,75 \text{ kg.}$

II. Fósforo

$\text{P por hectárea} = 0,79 \times 3.600.000 \div 1.000.000$

$\text{P por hectárea} = 2,844 \text{ kg}$

III. Magnesio

El Mg tiene peso atómico de 24 y valencia de 2

$\text{Mg por hectárea} = (24/2) \times 1,2 \text{ g cm}^{-3} \times 30 \times 0,26 \text{ meq}/100 \text{ g}$

$\text{Mg por hectárea} = 112,32 \text{ kg}$

ELEMENTO	RESULTADO EN kg ha ⁻¹	ABSORCIÓN DE NUTRIENTES EN kg ha ⁻¹	DIFERENCIA	FACTOR DE CONVERSIÓN (Tabla 8)	DOSIS A APLICAR EN kg ha ⁻¹
Elementos mayores					
Nitrógeno (N)	97,75	200	-102,25		102,25
Fósforo (P)	2,844	100	-97,156	2,2910 P ₂ O ₅	222,58
Magnesio (Mg)	112,32	30	+82,32	1,6581 MgO	136,5

Los datos de absorción de nutrientes son estimaciones experimentales y se obtienen de un ensayo que evaluó respuesta del arazá a diferentes fuentes de fertilización en Albania, Caquetá (2009), (Barrera *et ál.* 2009)

En conclusión, la fuente de fertilizante a usar en este cultivo debe contener elementos como el fósforo y el magnesio, y en lo posible nitrógeno. Fuentes orgánicas como el abono tipo Bocachi (obtenido de la fermentación aeróbica de estiércol de bovino) adicionado con cal dolomita permitirán incorporar al suelo elementos caracterizados como deficientes y proveer una mejor condición de acidez para favorecer la absorción. La deficiencia de magnesio obedece al contenido medio de potasio, ya que este compite con el Mg para entrar a la planta, por tanto la aplicación busca disponer de la cantidad suficiente de Mg que evite la deficiencia.

La dosis final para este caso se divide entre el número de árboles por hectárea para establecer así la forma de aplicación en dosis por árbol. La fuente se selecciona de tal manera que provea los tres elementos a considerar teniendo presente cubrir las cantidades señaladas.

