



GOBIERNO DE LA
REPÚBLICA DE HONDURAS

Dirección de Ciencia y Tecnología Agropecuaria (DICTA)



SECRETARÍA DE AGRICULTURA
Y GANADERÍA

MANEJO DE SUELOS ÁCIDOS DE LAS ZONAS ALTAS DE HONDURAS

CONCEPTOS Y MÉTODOS



UNIÓN EUROPEA



Programa Regional de Investigación e Innovación por Cadenas de Valor Agrícola (UE/IICA)

*Innovación para la seguridad alimentaria
y nutricional en Centroamérica y Panamá*



GOBIERNO DE LA
REPÚBLICA DE HONDURAS

Dirección de Ciencia y Tecnología Agropecuaria (DICTA)



SECRETARÍA DE AGRICULTURA
Y GANADERÍA

MANEJO DE SUELOS ÁCIDOS DE LAS ZONAS ALTAS DE HONDURAS

CONCEPTOS Y MÉTODOS

Tegucigalpa, Honduras
2016



UNIÓN EUROPEA



Programa Regional de Investigación e Innovación por Cadenas de Valor Agrícola (UE/IICA)

*Innovación para la seguridad alimentaria
y nutricional en Centroamérica y Panamá*

Toledo, Milton
Manejo de suelos ácidos de las zonas altas de Honduras: conceptos y métodos
/ Milton Toledo. – Honduras : IICA, 2016.
152 p.; 21,59 cm x 27,94 cm

ISBN: 978-92-9248-663-1

1. Manejo del suelo 2. Ph del suelo 3. Suelo ácido 4. Fertilidad del suelo
5. Toxicidad del suelo 6. Materia orgánica del suelo 7. Aplicación de abonos 8. Absorción
de sustancias nutritivas 9. Técnicas analíticas 10. Aplicación foliar I. IICA II. Título

AGRIS
P33

DEWEY
631.42

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), 2016



Manejo de suelos ácidos de las zonas altas de Honduras:
conceptos y métodos por IICA se encuentra bajo una Licencia Creative Commons
Reconocimiento-Compartir igual 3.0 IGO (CC-BY-SA 3.0 IGO)
(<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/igo/>)
Creado a partir de la obra en www.iica.int.

El Instituto promueve el uso justo de este documento. Se solicita que sea citado apropiadamente cuando corresponda.

Esta publicación también está disponible en formato electrónico (PDF) en el sitio Web institucional en <http://www.iica.int>

ISBN 978-99979-55-01-2

Una publicación de la Dirección de Ciencia y Tecnología Agropecuaria (DICTA), de la Secretaría de Agricultura y Ganadería (SAG) de Honduras.

Esta edición ha sido posible gracias al apoyo del Programa Regional de Investigación en Innovación por Cadenas de Valor Agrícola (PRIICA), financiado por la Unión Europea (UE), y al soporte técnico del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).

Se permite el uso parcial o total de la obra, siempre y cuando se cite la fuente y sea para fines educativos, no de lucro. Prohibida su venta.

Nota: Los nombres comerciales se mencionan únicamente como referencia. Su uso no implica ningún compromiso institucional con ninguna casa comercial, ni una crítica a productos similares que no han sido mencionados.

Dirección de Ciencia y Tecnología Agropecuaria (DICTA). Ave. La FAO, Blvd. Centro América,
Col. Loma Linda Norte. Apdo. Postal 5550, Tegucigalpa, M. D. C. Honduras C. A.
Tel. (504) 2232-2451, 2232-6652, 2235-6025.
comunicaciondicta@gmail.com
www.dicta.hn

Créditos

Nombre de la obra: Manejo de suelos ácidos en las zonas altas de Honduras: conceptos y métodos

Autor: Ing. Milton Toledo

Revisión del contenido técnico: Dr. Carlos Gauggel

Edición: Dra. Miriam Villeda

Primera edición

2016

CONTENIDO

Presentación.....	5
Introducción.....	7
1. Formación de los suelos.....	9
1.1 Procesos de formación de los suelos.....	11
1.2 Efecto del clima y el relieve sobre el desarrollo de los suelos.....	15
2. Cómo los suelos proveen nutrientes a las plantas.....	19
2.1 Los coloides.....	19
2.2 Cómo medir la fertilidad de los suelos.....	22
2.3 Ejemplo de determinación de la fertilidad de un suelo mediante la CICE, la saturación de bases y la acidez intercambiable.....	28
3. El pH del suelo.....	35
3.1 Concepto.....	35
3.2 Métodos de medición del pH.....	37
3.3 Causas de la acidez de los suelos.....	38
3.4 Las toxicidades del aluminio y manganeso en suelos ácidos.....	42
3.5 Corrección del exceso de aluminio en el suelo.....	45
3.6 Uso de los fertilizantes en suelos ácidos.....	60
4. La materia orgánica.....	61
4.1 Concepto.....	61
4.2 Cantidad de materia orgánica que debe ser aplicada a los suelos.....	65
4.3 Procesamiento y manejo de la gallinaza.....	69
5. Los nutrientes.....	73
5.1 Concepto.....	73
5.2 Absorción de nutrientes por las plantas desde el suelo.....	74
5.3 Nutrientes que las plantas requieren en altas cantidades.....	77
5.4 Métodos para determinar las cantidades de nutrientes a aplicar a los cultivos.....	107
6. El análisis químico del suelo.....	109
6.1 Métodos de medición.....	109
6.2 Determinación de nutrientes en el laboratorio.....	112
6.3 Niveles de suficiencia del análisis del suelo.....	119
6.4 Toma de las muestras de suelo.....	122
6.5 Análisis foliar.....	124
7. Aplicación foliar de los nutrientes.....	127
7.1 Cuándo se deben hacer fertilizaciones foliares.....	127
7.2 Factores que influirán en el éxito de la aplicación foliar de nutrientes.....	128
7.3 Dosis de aplicación foliar de los nutrientes.....	131
Bibliografía.....	135
Anexos.....	145



PRESENTACIÓN

Como fin primordial de apoyar a los productores en la práctica de una agricultura rentable, se ha producido el manual “Manejo de suelos ácidos de las zonas altas de Honduras. Conceptos y métodos”, que brinda información confiable sobre cómo explotar aquellos suelos que han sufrido un deterioro en sus nutrientes y por ende son causa de bajos rendimientos.

La Dirección de Ciencia y Tecnología Agropecuaria (DICTA), dependencia de la Secretaría de Agricultura y Ganadería (SAG), con el apoyo del Programa Regional de Investigación en Innovación por Cadenas de Valor Agrícola (PRIICA), financiado por la Unión Europea y el soporte técnico del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, (IICA), pone en manos de técnicos, productores, y de todos los interesados, esta obra literaria que es resultado de investigaciones cuyo objeto ha sido el manejo adecuado de la química del suelo.

En un mismo documento, el lector podrá encontrar conceptos que le ayudarán a estandarizar y profundizar su visión sobre temas como la formación de suelos, el efecto de la provisión de nutrientes de parte del suelo a las plantas, el pH del suelo, la materia orgánica, los nutrientes y su aplicación, entre otros tópicos de relevancia.

Métodos para usar suelos deteriorados pueden haber muchos, sin embargo no necesariamente garantizan rentabilidad o un manejo equilibrado de los mismos.

Le invitamos a sumergirse en la lectura de esta obra, analizar los planteamientos y a ponerlos en práctica con el ánimo y certeza que los resultados de su actividad agrícola serán óptimos, en tiempo, productividad, rentabilidad y satisfacción.

Nuestro alto reconocimiento al Ing. Milton Toledo, autor de esta obra que es un legado de su conocimiento y experiencia y un agradecimiento al Dr. Carlos Gauggel por su valioso aporte en la revisión del contenido técnico.

En la editorial DICTA, continuamos generando más literatura para la gestión del conocimiento en el desarrollo social y económico del país.

Ing. Jeovany Pérez Valenzuela
Director Ejecutivo DICTA



INTRODUCCIÓN

Existen diferentes tipos de suelos usados para la agricultura: calcáreos, sódicos, orgánicos, entre otros; cada uno de ellos requiriendo diferentes formas de manejo.

Los suelos ácidos del trópico abarcan cerca del 50 % de los suelos tropicales en el mundo y, en general, son considerados infértiles y de baja productividad (Vitorello, 2005; Lafitte, 2001). Este tipo de suelos se han desarrollado en aquellas regiones donde anualmente se presentan largos períodos en que la cantidad de lluvia sobrepasa la evaporación, como sucede en gran parte de las zonas altas de Honduras. A través del tiempo, las fuertes lluvias han provocado el lavado de nutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas, como el calcio y el magnesio, además de la acumulación excesiva de hidrógeno, aluminio, manganeso y hierro. Muchas plantas tropicales resisten este medio, sin embargo, las especies cultivables que han sido mejoradas en condiciones de suelo diferentes, como las hortalizas explotadas en las zonas altas de Honduras (papa, repollo, coliflor, brócoli, arveja, fresa, etc.), presentan sensibilidad a esta condición y es, en gran proporción, causa de sus bajos rendimientos.

En Honduras, el desconocimiento respecto a la forma como se deben explotar estos suelos, ha llevado a que se utilicen métodos de manejo basados en el uso intensivo de fertilizantes sintéticos, situación que contribuye a agudizar el problema y ocasiona niveles de competitividad muy bajos en sus agricultores. El desarrollo de una agricultura rentable y sustentable en estos suelos es posible siempre que se utilicen métodos de manejo que permitan revertir este estado de desequilibrio químico.

Este documento tiene como objetivo, servir de apoyo a los agrónomos que asisten a agricultores de las zonas altas de Honduras. En el texto se incluyen los resultados de investigaciones relacionadas con el manejo adecuado de la química de los suelos desarrollados en esas zonas, acompañado de los conceptos generales que ayudan a explicar la dinámica de dichos suelos.

1. FORMACIÓN DE LOS SUELOS

Los diversos minerales que actualmente conforman los suelos fueron traídos a la superficie por el magma volcánico desde el interior del planeta. El magma es una masa fluida muy caliente (800 °C – 1400 °C) que emana desde el interior de la tierra a través de los volcanes. Al llegar a la superficie, el magma se solidifica dando lugar a rocas de variada composición mineralógica, denominadas **ígneas volcánicas**, las que se han formado del magma solidificado en la superficie terrestre o **ígneas plutónicas**, cuando se han solidificado por debajo de la superficie terrestre. A través del tiempo (miles y hasta millones de años), estas rocas se han ido descomponiendo para dar lugar al suelo (figura 1).

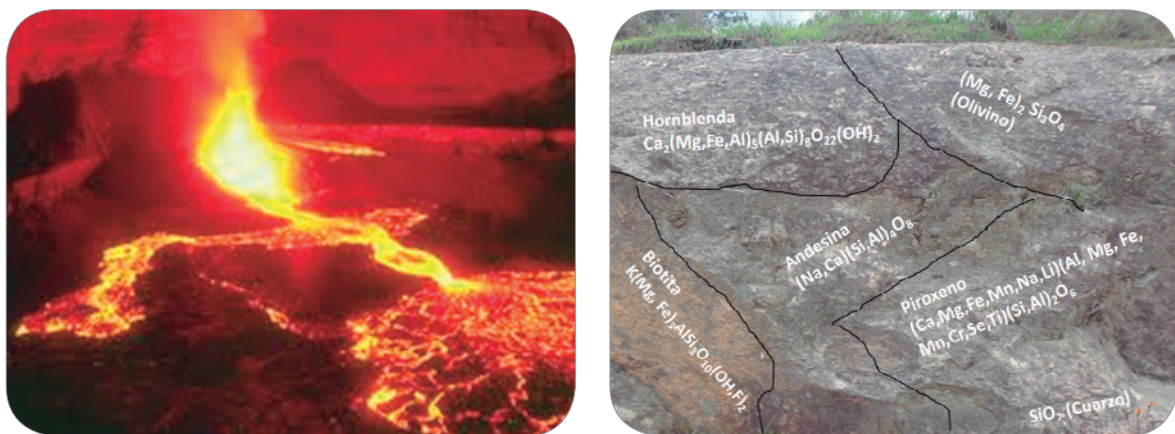


Figura 1. A la izquierda: magma caliente que al enfriarse y solidificarse dará lugar a las rocas; a la **derecha:** magma solidificado o roca, sobre la cual se ha superpuesto la composición química de los minerales que forman cierto tipo de roca denominada andesita y que, con el tiempo, al descomponerse para formar suelo, proveerán muchos de los nutrientes requeridos por las plantas.

Fuentes: Supergalaxia.wordpress.com (fotografía a la izquierda); Milton Toledo (fotografía a la derecha).

Sin embargo, actualmente muchas de las rocas difieren de las del antiguo magma, ya que a través del tiempo y debido a procesos físicos y químicos impuestos por el ambiente, las han llevado a sufrir cambios que las han transformado, denominándoseles, por eso, rocas **meta-mórficas** (Bosi *et al.*, 2011). Ejemplo de metamorfización de la roca es el largo proceso de compactación que sufren las arenas de cuarzo (SiO_4) para formar la roca cuarcita, o también el proceso de ordenamiento de cristales que sufre, a través del tiempo, la piedra caliza para dar lugar a una roca más compacta y resistente denominada mármol, o el proceso químico que lleva a que la roca caliza (CaCO_3) en contacto con restos de cuarzo (SiO_4) formen la roca wollastonita (CaSiO_3).

Por otro lado, a través del tiempo y en diversos lugares se ha acumulado material erosionado de las rocas y restos orgánicos que, al ir quedando bajo el peso de más material acumulado, se compacta dando lugar a otro tipo de rocas denominadas **sedimentarias** (Bosi *et al.*, 2011),

como la toba silíceas formada por la compactación de areniscas erosionadas de roca de cuarzo (riolita). También son ejemplo de roca sedimentaria la roca caliza, la toba calcárea y el carbón, formadas por compactación de restos de animales y plantas que se han acumulado.

Dado que existe una amplia variedad de rocas, eso mismo da lugar a diferentes tipos de suelo, cada uno caracterizado por las peculiaridades que le imprime la roca desde donde se origina (cuadro 1, figura 2). Por ejemplo, y como lo indican Donahue *et al.*, (1981): “Suelos derivados de la roca granito (Roca plutónica equivalente mineralógicamente a la roca volcánica riolita) pueden ser arenosos y poco fértiles, mientras que los derivados a partir de roca caliza pueden ser francos y de buena fertilidad”.

Cuadro 1. Algunos tipos de rocas y sus principales componentes minerales.

Rocas volcánicas	Minerales que la componen	Composición química
Riolita	Cuarzo	SiO_4
	Ortoclasa (Feldespato)	KAlSi_3O_8
	Muscovita (Mica blanca)	$(\text{KNa})\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Andesita	Plagioclasa (Feldespato)	$(\text{Ca,Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8$
	Piroxeno	$(\text{Ca,Mg,Fe,Mn,Na,Li})[\text{Al,Mg,Fe,Mn,Cr,Sc,Ti}](\text{Si,Al})_2\text{O}_6$
	Anfibol	$\text{Li}_2[(\text{Fe}^{2+})_3\text{Al}_2]\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH,F})_2$ ó $\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe}^{2+})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ y muchos otros
	Biotita (Mica negra)	$\text{K}(\text{MgFe})_3(\text{SiAl})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Basalto	Olivino	$\text{SiO}_4(\text{MgFe})$
	Plagioclasa	$(\text{Ca,Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8$
	Piroxeno	$(\text{Ca,Mg,Fe,Mn,Na,Li})[\text{Al,Mg,Fe,Mn,Cr,Sc,Ti}](\text{Si,Al})_2\text{O}_6$
Rocas metamórficas		
Mármol	Calcita	CaCO_3
Espilita	Albita	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$
	Clorita	$(\text{Mg,Fe})_3(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot (\text{Mg,Fe})_3(\text{OH})_6$
Cuarcita	Areniscas de cuarzo recristalizado	SiO_4
Rocas sedimentarias		
Toba calcárea	Deposiciones de calcita	
Roca caliza	Calcita originada de la deposición de restos de animales marinos	
Carbón	Por deposición y descomposición de restos vegetales en condición anaeróbica	C,N,S,H

1.1 Procesos de formación de los suelos

El suelo se forma lentamente, 0.036 mm/año (PNAS, 2007), a partir de la roca y debido a sendos procesos físicos, biológicos y químicos que van causando su ruptura paulatina, hasta convertirla en partículas tan pequeñas como la arcilla (figura 2).

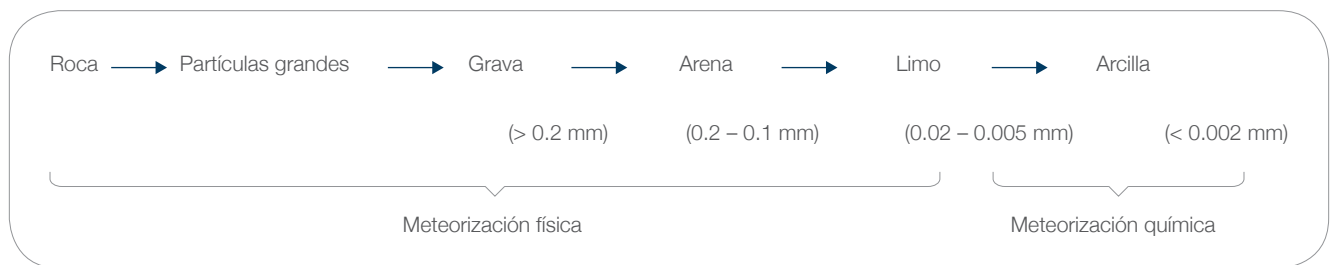


Figura 2. Proceso de degradación de la roca.

1.1.1. Meteorización física

Los primeros procesos de descomposición son físicos y biológicos. Inicialmente, la roca es desquebrajada por la acción mecánica de factores abióticos como el hielo y deshielo, el golpe abrasivo del viento cargado de partículas sólidas, el granizo, la lluvia, los cambios extremos de temperatura que dan lugar a la dilatación y la contracción de la roca, así como por la gravedad que causa desprendimientos y rodamientos.

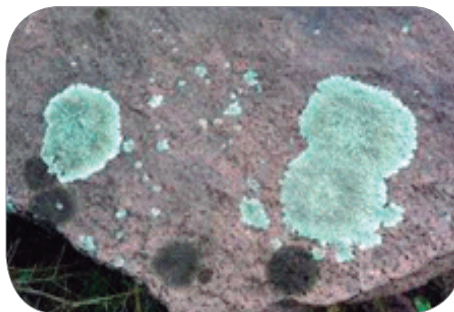


Figura 3. Líquenes en una roca.

Fuente: lasombradelaaguja.blogspot.com

Paralelamente, la roca es atacada por organismos capaces de extraer de ella nutrientes, como los líquenes (figura 3), y que al enraizarse en la roca ayudan a degradarla en partículas más pequeñas, a la vez que adicionan materia orgánica.

Esta materia orgánica inicial atrae otros microorganismos que la descomponen y liberan, componentes que posteriormente ayudarán en el proceso químico de descomposición. Este proceso de ruptura permite que la roca quede más expuesta a los elementos que causan la meteorización química.

1.1.2. Meteorización química

El proceso de descomposición química de la roca comienza cuando el agua se introduce al interior de la roca, dando lugar a reacciones de “descomposición” por hidrólisis y que, entre otros aspectos, permite, por ejemplo, la formación de arcillas. También cuando el CO_2 , que es arrastrado por la lluvia desde el aire hasta el interior de las rocas o por la actividad de los microorganismos, se mezcla con el agua dando lugar al ácido carbónico, molécula que reaccionará con diversos minerales de la roca, alterándola y dando lugar a nuevos minerales y liberando átomos en forma iónica. Asimismo, son importantes las reacciones de “óxido reducción” que al incrementar o reducir el tamaño de los átomos de los minerales de la roca (cuando pierden electrones se hacen pequeños y cuando ganan electrones se hacen grandes) facilitan su ruptura. Tomemos como ejemplo el hierro en forma iónica; cuando este elemento está en su forma reducida (Fe^{+2}) tiene un radio de 0.83 Angstrom (símbolo Å , equivalente a dividir en un millón de partes un milímetro) pero cuando se oxida, pierde un electrón (Fe^{+3}) disminuyendo su radio a 0.67 Å (Besoain, 1985). Además, hay que mencionar reacciones químicas de importancia en el proceso de meteorización química del suelo como las de “disolución” que permiten la descomposición final de diversos minerales para liberar nutrientes al medio; como el carbonato de calcio (CaCO_3) que al reaccionar con el agua libera calcio (Ca^{+2}), o como cuando el fosfato de calcio (CaHPO_4) reacciona con el agua para dar lugar a Ca^{+2} y ácido fosfórico (HPO_4^{-2}).

Con el tiempo, sobre la roca se van acumulando capas superpuestas (denominadas horizontes) de material inorgánico y orgánico no consolidado, que al permitir el intercambio gaseoso y de nutrientes se convierte en el medio natural para el crecimiento de las plantas (figura 4).

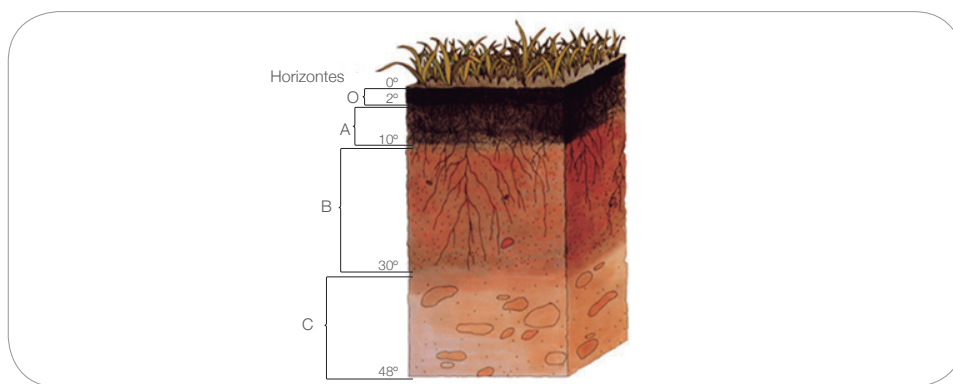


Figura 4. Capas u horizontes que componen un suelo desarrollado.

Horizonte O: materia orgánica sin descomponer, o parcialmente descompuesta.

Horizonte A: capa de suelo mineral mezclado con materia orgánica parcial, o totalmente descompuesta.

Horizonte B: también denominado subsuelo. Es una capa de suelo mineral enriquecido con material del horizonte A que ha llegado por filtración (principalmente diferentes tipos de arcilla, compuestos húmicos y cationes).

Horizonte C: material parental o roca madre parcialmente descompuesta.

Fuente: USDA Natural Resource Conservation Service.

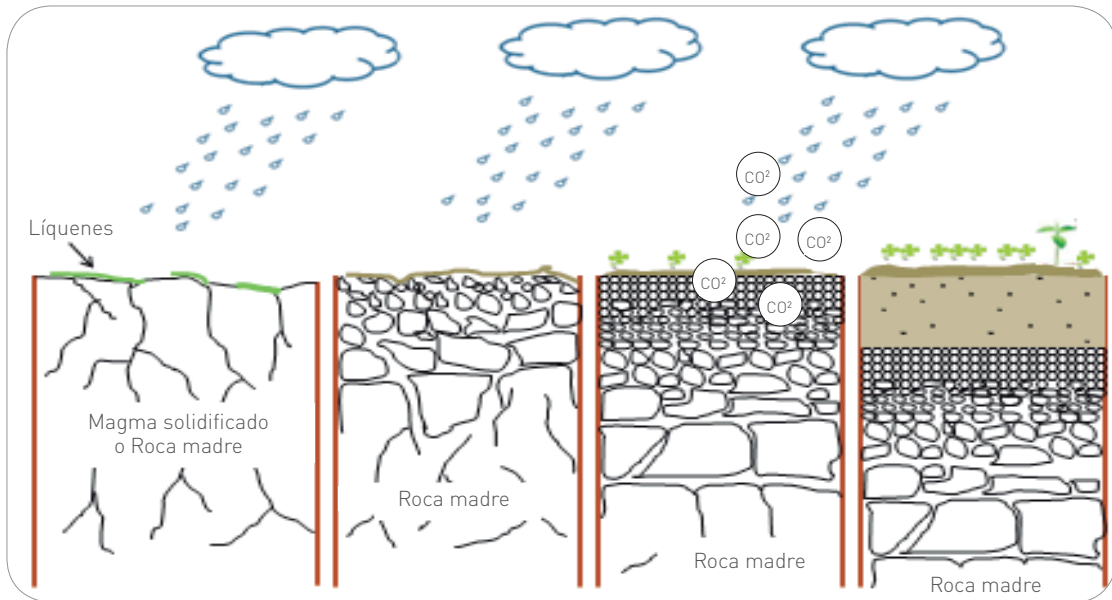


Figura 5. Procesos de formación del suelo.

Meteorización física: el primer proceso para la formación del suelo es la degradación o meteorización física de la roca madre. La humedad, los cambios extremos de temperatura (calor y frío), el hielo, el granizo, el viento, la presión atmosférica, comienzan a resquebrajar la roca madre hasta convertirla, después de mucho tiempo, en partículas muy pequeñas.

Paralelamente, la roca es atacada inicialmente por organismos como los líquenes, que sustraen minerales de la roca, incrustándose en su superficie. Al ir muriendo los líquenes, van aportando materia orgánica. Ante la presencia de esta primera materia orgánica, nuevos microorganismos se hacen presentes, como bacterias y hongos.

No obstante y por muy fino que sea el tamaño de las partículas (como el limo), este no será suelo hasta que se presenten las reacciones químicas que permiten los procesos que llevan a la formación de arcillas y de intercambio de nutrientes entre las fases sólida y líquida del suelo, las cuales se darán durante la meteorización química.

Meteorización química: se inicia con la llegada del agua y CO_2 al interior de la roca, e incluye las siguientes reacciones químicas:

- **Hidrólisis.** Por ejemplo, cuando el mineral feldespato reacciona con el agua para formar arcilla:



- **Carbonatación.** El CO_2 reacciona con el agua para formar ácido carbónico. Este ácido carbónico participará después en una serie de reacciones que van dando lugar a la formación del suelo:



El H_2CO_3 reacciona, por ejemplo, con el mineral dolomita, liberando calcio y magnesio, que después nutrirán las plantas:



- **Oxido - reducción.** Estas reacciones afectan la química del suelo de muchas maneras, entre ellas permitiendo la disponibilidad de nutrientes para las plantas, pero también ayudan a la degradación de la roca, al incrementar o disminuir el tamaño de los átomos.



1.2 Efecto del clima y el relieve sobre el desarrollo de los suelos

Existe una gran diversidad de suelos en el planeta, todos diferenciados por sus distintas composiciones químicas, orgánicas y físicas. Como mencionamos, esta variabilidad se debe, en parte, a las diferencias entre las rocas de las cuales se originan, pero, además, parte de esas diferencias se debe a las condiciones climáticas, topográficas y de vegetación particular del lugar donde los suelos se desarrollan.

1.2.1. Efecto de la lluvia

En áreas cuya condición climática se caracteriza por presentar altos volúmenes de precipitación y alta temperatura ambiental (y en condiciones de buen drenaje y en ausencia de erosión), tienden a presentarse suelos bien desarrollados y por tanto, profundos. Esto porque la lluvia, en conjunto con la temperatura ambiental, tienen una fuerte influencia en la velocidad de formación del suelo.

Por otro lado, el agua de lluvia al atravesar el horizonte del suelo percola o lava componentes químicos de su mineralogía y nutrientes disueltos en la solución del suelo. En áreas donde la intensidad (cantidad de lluvia/tiempo) y los volúmenes de lluvia son altos, se han desarrollado suelos de baja fertilidad debido a la pérdida de nutrientes, en especial bases intercambiables, como el calcio y el magnesio. Los lugares antes ocupados por estos elementos son paulatinamente ocupados por el hidrógeno, lo cual lleva a que los suelos se acidifiquen. Cuando la acidez es excesiva (por debajo de 5.5), numerosos suelos llegan a acumular metales, como el aluminio y manganeso, a extremos que pueden ser causa de intoxicación de muchos cultivos. En estos suelos, el fósforo es escaso debido a que generalmente se encuentra de forma insoluble para las plantas, formando compuestos como fosfatos de aluminio y manganeso. También, en los casos extremos, estos suelos presentan baja capacidad de retener nutrientes debido a que las arcillas pierden esta capacidad al ser degradadas por el intenso lavado, como las arcillas caolinitas.

A nivel global, estos suelos tienden a desarrollarse en los trópicos húmedos, dados los intensos regímenes de precipitación que caracteriza a estas regiones. Por eso, a estos suelos se les conoce como **“suelos ácidos tropicales”**.

En el otro extremo están los suelos desarrollados en áreas de baja o escasa precipitación. Bajo esta situación, los suelos acumulan sales (carbonato de calcio, cloruro de sodio y magnesio, sulfatos de magnesio, carbonatos de calcio, magnesio y sodio), aspecto que limita el desarrollo de la agricultura. La salinidad de los suelos se propicia cuando la evaporación del agua del suelo es mayor que el aporte de agua por las lluvias. Lo anterior provoca que sales se acumulen en la superficie del suelo por movimientos capilares (movimiento del agua a través

de los poros del suelo por fuerzas de adhesión y tensión) o arrastrados por el agua evaporada. Una característica de estos suelos es la de presentar pH alcalinos (por arriba de 7.0). A estos suelos se les denomina en general **“salinos”**, aunque de acuerdo con el elemento que más acumulan pueden denominárseles **“sódicos”**, cuando acumulan sodio, o **“calcáreos”**, cuando presentan alto contenido de carbonato de calcio (figura 6).

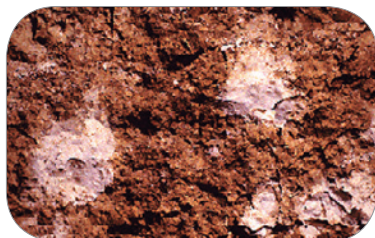


Figura 6. Porciones del suelo con elevada concentración de sales.

Fuente: www.edafología.net.

1.2.2. Efecto del relieve

La profundidad del suelo es también afectada por el relieve del terreno, siendo común encontrar suelos poco profundos e incluso, con afloramientos rocosos en zonas escarpadas (figura 7), donde el suelo es continuamente erosionado por la lluvia, acumulándose más abajo, en áreas planas al pie de cerros y montañas (vegas de ríos, planicies costeras, valles) y en las profundidades de lagos y mares. A suelos que han acumulado suelo arrastrado por la lluvia u otros medios, se les denomina **“suelos aluviales”** y dada su profundidad y acumulación de nutrientes, pueden llegar a ser de los más fértiles para la agricultura.



Figura 7. Diferentes profundidades del suelo. **Izquierda:** perfil de un suelo profundo; **Centro:** suelo de poca profundidad; **Derecha:** afloramiento rocoso.

Con base en lo anterior, es claro que la capacidad de los suelos para permitir una agricultura rentable será variable, dependiendo del tipo de suelo disponible. Todos los suelos se encuentran o hacia lo ácido o hacia lo salino, o hacia lo profundo o superficial, y dependiendo de qué tan cerca estén de los extremos, requerirán algún tipo de manejo especial para mejorar sus condiciones de fertilidad. Por eso, el primer punto por considerar, antes de desarrollar proyectos de producción agrícola que incluyan el uso del suelo, es el conocimiento detallado del tipo o tipos de suelo sobre los que se trabajará y de acuerdo con esto, escoger las especies vegetales que mejor se adapten, o elaborar medidas de mejoramiento cuando sus características se alejen de lo idóneo para las especies por cultivar. También debe considerarse que al desarrollar la agricultura podemos agudizar aquellos aspectos negativos inherentes al suelo, volviéndolos más ácidos o más salinos, o degradándolos en general por la erosión. Estos aspectos deben incluirse también en los planes de manejo de los suelos para limitar los procesos de degradación.

2. CÓMO LOS SUELOS PROVEEN NUTRIENTES A LAS PLANTAS

2.1 Los coloides

Uno de los componentes más importantes de los suelos son los coloides. Los coloides son partículas minerales (como las arcillas) u orgánicas (como la materia orgánica en últimos estados de descomposición), que tienen la característica de poseer en su superficie cargas eléctricas sin neutralizar, tanto negativas como positivas. Los nutrientes de las plantas también tienen cargas eléctricas. Esto porque los nutrientes son átomos o moléculas que poseen electrones o protones sin neutralizar. A los que tienen cargas positivas (por exceso de protones) se les denomina bases o cationes y son el amonio, el potasio, el calcio, el magnesio, el hierro, el manganeso, el zinc y el cobre y a los que tienen carga negativa (por exceso de electrones) se les denomina aniones y son el nitrato, el ácido fosfórico, el sulfato, el ácido bórico y el molibdato. En el cuadro 2 se presentan los símbolos y la carga de los nutrientes esenciales para las plantas.

Cuadro 2. Nutrientes esenciales para las plantas.

Cationes	Símbolo y carga	Aniones	Símbolo y carga
Dióxido de carbono	CO ₂	Nitrato	NO ₃ ⁻
Calcio	Ca ⁺⁺	Sulfato	SO ₄ ⁼
Magnesio	Mg ⁺⁺	Ácido fosfórico	H ₂ PO ₄ ⁻ y HPO ₄ ⁼
Potasio	K ⁺	Molibdato	MoO ₄ ⁼
Sodio	Na ⁺	Oxígeno	O ⁼
Hierro	Fe ⁺⁺ y Fe ⁺⁺⁺	Ácido bórico o hidróxido de boro	H ₂ BO ₃ ⁻ y B(OH) ₄ ⁻
Manganeso	Mn ⁺⁺		
Amonio	NH ₄ ⁺		
Hidrógeno	H ⁺		
Zinc	Zn ⁺⁺		
Cobre	Cu ⁺⁺		

Los nutrientes se adhieren a los coloides atraídos por sus cargas; los nutrientes de carga positiva o cationes se adhieren a los espacios de los coloides con carga negativa y los de carga negativa o aniones, se adhieren a los espacios con carga positiva (figura 8). Gracias a esto, los nutrientes se mantienen en las capas superiores del suelo y pueden ser aprovechados por las plantas. Sin esto, los nutrientes se perderían a sustratos profundos del suelo donde la mayoría de las plantas no pueden absorberlos. El contenido de coloides es fundamental para la fertilidad de los suelos: a más coloides, mayor fertilidad, ya que hay una mayor capacidad de almacenamiento de nutrientes.

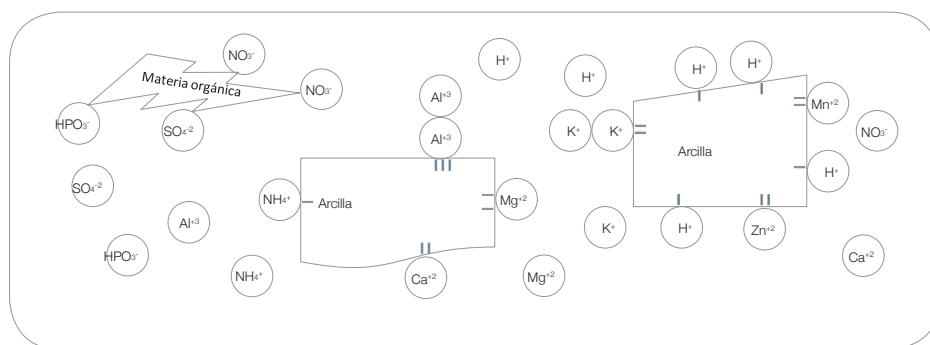


Figura 8. Representación de los nutrientes adheridos a los coloides (arcilla y materia orgánica) y otros flotando en la solución del suelo.

Las plantas absorben los nutrientes cuando estos se encuentran flotando en la solución del suelo. Cuando un nutriente es absorbido por las plantas, este es repuesto a la solución del suelo desde los que están adheridos a los coloides, a manera de mantener cierto equilibrio. En el cuadro 3 se presenta, de forma muy general, la proporción de nutrientes contenidos en la solución del suelo y los adheridos a los coloides. Se considera que alrededor del 98 % de los nutrientes esenciales para las plantas están inmovilizados en los minerales y materia orgánica del suelo, un 1.8 % está adherido a los coloides y solo un 0.2 % se encuentra en la solución (Valagro, 2004).

Cuadro 3. Proporción de nutrientes adheridos a los coloides y en el agua del suelo.

Catión	Adherido a los coloides o intercambiables	En el agua del suelo o en solución	Proporción (%) en agua del suelo respecto a los retenidos en los coloides
cmoles (+)/kg de suelo			
Calcio	34.4	0.175	0.5
Magnesio	7.8	0.074	0.9
Potasio	0.9	0.011	1.2
Sodio	0.5	0.016	3.1

Si aplicamos un nutriente al suelo mediante el fertilizante, este entra a la solución del suelo, quedándose una pequeña parte ahí, en la solución, mientras que el resto se irá adhiriendo a los coloides. Los nutrientes que flotan en la solución están ya disponibles para ser absorbidos por las plantas, mientras que los que están adheridos a los coloides están en almacenamiento, listos para reponer los nutrientes que van faltando en el agua. A los nutrientes adheridos a los coloides se les denomina “de intercambio” o “en sitios o puntos de adsorción”, y a los que están en el agua del suelo de les denomina “en solución”, como se representa en la figura 9.

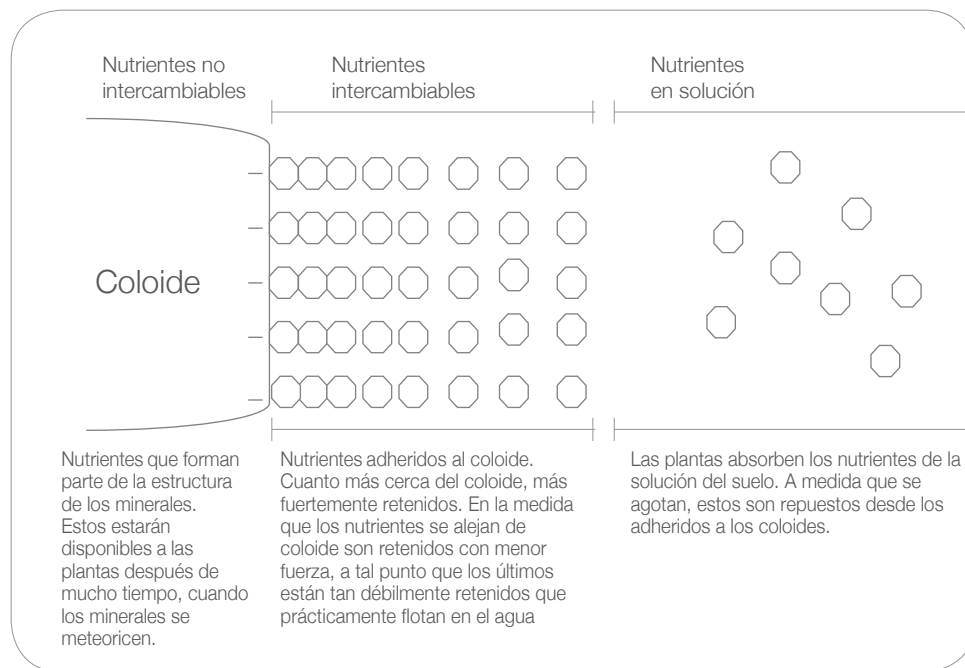


Figura 9. Representación de las diferentes reservas de nutrientes en el suelo.

Cuando las plantas están en rápido crecimiento, estas requieren mayor cantidad de nutrientes desde el agua del suelo y, para que no se presenten deficiencias, es necesario que estos nutrientes sean repuestos desde los coloides, a la misma velocidad en que son tomados. En el caso de los cultivares y variedades modernas, de altos rendimientos pero también de altos requerimientos nutricionales, durante este período de mayor crecimiento (que en general en los cultivos anuales va de los 30 días después de la siembra hasta el inicio de la floración), la reposición de nutrientes podría no llevarse a tiempo y se podrían presentar deficiencias nutricionales, aun cuando los nutrientes se encuentren en el suelo en cantidades adecuadas. En estos casos, se hace necesario reforzar la nutrición de las plantas mediante la aplicación de fertilizantes al suelo o al follaje.

2.2. Cómo medir la fertilidad de los suelos

2.2.1. Capacidad de intercambio catiónico

Una medida del nivel de fertilidad de los suelos de gran importancia es la capacidad de intercambio catiónico, denominado por sus iniciales como CIC. La CIC nos indica la capacidad de un suelo de almacenar en sus coloides, nutrientes de carga positiva o cationes, o dicho de otro modo, nos da la cantidad de cargas negativas del suelo. Suelos con una alta CIC son más fértiles que los de baja CIC. En suelos con una baja CIC, los espacios donde puedan adherirse los nutrientes son reducidos, por lo que muchos de ellos quedan en la solución del suelo expuestos a ser lavados por el agua de riego o lluvias. En el cuadro 4 se presentan estimados de la CIC en suelos, de acuerdo con su clase textural.

Cuadro 4. Relación entre la textura de los suelos y su capacidad de intercambio catiónico.

Textura	CIC cmoles/kg de suelo
Arenoso	1 – 5
Franco arenoso	5 – 10
Franco limoso	5 – 15
Franco arcilloso	15 – 30
Arcilloso	> 30

Fuente: Donahue *et al.* 1981.

La CIC se obtiene por varios métodos de laboratorio y a partir de muestras de suelo. No hay un método que sea ideal para todos los suelos y el uso de alguno de ellos dependerá, en especial, del tipo de coloide predominante en los suelos de donde se originan las muestras.

El tipo de carga (positiva o negativa) que presentan los coloides puede ser afectada por el pH del suelo y de acuerdo con esto, hay dos tipos de coloides:

- 1. Coloides de carga permanente:** Estos mantienen su carga sin importar cuál sea el pH. Se considera que este tipo de coloides son los predominantes en suelos de zonas templadas (Sánchez, 1981).
- 2. Coloides de carga variable:** En este caso, la carga de los coloides es afectada por el pH del suelo, de tal forma que su tipo de carga cambia cuando el pH se mueve hacia arriba o hacia abajo de cierto nivel de pH, denominado carga cero. Por debajo de la carga cero, los coloides adquieren carga neta positiva, atrayendo y reteniendo elementos con carga negativa (fósforo, azufre, nitratos, boro, molibdeno) y por arriba de la carga cero, las cargas se vuelven negativas, atrayendo y reteniendo elementos con carga positiva (amonio, potasio,

calcio, magnesio, hierro, manganeso, sodio, zinc, cobre, aluminio). Se considera que este tipo de coloide es particularmente significativo en los suelos tropicales (Sánchez, 1981).

Algunos de los métodos de determinación de la CIC en los laboratorios implican un cambio en el pH de las muestras, como por ejemplo, extracción mediante el cloruro de bario-trietilamina, en cuyo caso la muestra es llevada a un pH de 8.2 antes de desarrollar la extracción, o el de extracción mediante el acetato de amonio a pH de 7.0. Cuando las muestras vienen de suelos con importantes contenidos de coloides con carga variable y bajos pH, estos dos métodos darán una medida errada, ya que al cambiar el pH de ácido, que es el estado natural de las muestras (como es el caso de las zonas altas de Honduras con pH menores a 5.5), a básico, en el laboratorio (pH de 7 en adelante) provocará que los coloides de carga variable, presentes en estos suelos, cambien a carga negativa, lo cual sobreestimaré la CIC, indicándonos que el suelo tiene una mayor CIC de la que en realidad posee (Sánchez, 1981). En el cuadro 5 se presenta un ejemplo de cómo la variación del pH afecta los resultados finales.

Cuadro 5. Efecto del cambio del pH de la muestra en el laboratorio sobre la CIC en una muestra de un suelo venezolano con carga variable.

Procedencia de la muestra	CIC en cmoles (+)/kg de suelo		
	pH 8.2	pH 7.0	pH natural del suelo
Barimas	8.1	5.1	4.3
Caicara	4.5	3.9	1.6
Atapo	10.6	5.4	2.8
Pedraza	18	10.6	8.4

Fuente: Casanova Olivo, 1992.

Estos métodos funcionan mejor en suelos con una alta proporción de coloides de carga permanente, como muchos de los de las zonas templadas, o en suelos cuyo pH natural sea similar al pH de la prueba. Debido a esto, se considera que la mejor medida de la CIC en los suelos ácidos del trópico es por suma de cationes extraídos sin modificar el pH natural del suelo, ya que al no variar el pH de la muestra, nos dará una medida más real de la CIC (Wild y Russell, 1992; Fassbender, 1994; Sánchez, 1981). A la CIC obtenida de este modo se le denomina Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva, CICE, por sus iniciales, y es la suma de los cationes calcio, magnesio, potasio, sodio, aluminio (McKean, 1993).

CICE= Calcio (Ca^{+2}) + Magnesio (Mg^{+2}) + Potasio (K^{+}) + Sodio (Na^{+}) + Aluminio (Al^{+3})

La CICE no da la totalidad de cargas negativas del suelo, ya que, como se ve en la ecuación solo incluye cinco elementos de carga positiva, lo que significa que solo está midiendo las cargas negativas del suelo ocupadas por estos cinco elementos; faltaría el resto de elementos de carga positiva adheridos a los coloides, como el amonio, el hierro, el manganeso, el zinc, el

cobre y otros, para considerar que se está midiendo la totalidad de cargas negativas del suelo. Dado lo anterior, es de esperar que la CICE sea menor que la CIC.

La CICE solo contempla tres de los ocho nutrientes de carga positiva (cationes) esenciales para las plantas. Estos son los denominados “bases intercambiables”: el calcio, el magnesio y el potasio. Esto es así debido a que estos son los cationes predominantes en los suelos, presentándose, bajo condiciones normales, en contenidos mucho mayores al resto.

Otro elemento incluido en la CICE es el sodio. Este elemento es usado por las plantas en pequeñas cantidades, sin embargo, puede dañarlas cuando se presenta en el suelo en altas concentraciones (por salinidad o sodicidad). El sodio es un problema en lugares secos, donde la cantidad de lluvia es menor a la evaporación y por lo cual es importante mantenerlo en observación. En el caso de lugares con altas precipitaciones, como las zonas altas de Honduras (1200 mm/año), el sodio se encuentra en muy bajos niveles, a tal grado que incluso se puede prescindir de este elemento en los cálculos de la CICE.

También se incluye en la CICE al aluminio. Este elemento causa acidez en los suelos debido a que al reaccionar con el agua, libera hidrógeno a la solución ($Al^{+3} + H_2O \rightarrow Al(OH)^{+2} + H^+$). Al hidrógeno en el agua del suelo se le denomina “acidez activa” y a la sumatoria del hidrógeno y aluminio adherido a los coloides se le llama “acidez intercambiable”. El aluminio soluble en el suelo, en general, no le sirve a las plantas cultivadas debido a que este no es esencial para su desarrollo. Lo mismo pasa con el hidrógeno, que aunque sí es esencial para el desarrollo de las plantas, estas lo obtienen de la molécula de agua y no del hidrógeno libre en la solución del suelo.

Tanto el hidrógeno como el aluminio en exceso reducen la disponibilidad de otros nutrientes en el suelo y en altas concentraciones llegan a causar daño a las plantas por toxicidad. En el caso de la zona alta de Intibucá y todas las zonas tropicales con regímenes intensos de lluvia, la acidez y la toxicidad por aluminio son de los principales factores provocando la infertilidad de los suelos (Vitorello, 2005; Lafitte, 2001).

En general, es deseable que en los suelos agrícolas los elementos sodio y aluminio estén en menor cantidad que los nutrientes calcio, magnesio y potasio.

El reconocimiento de la CIC debe ser el primer paso para cualquier estudio de la fertilidad del suelo. Si la CIC de un suelo es baja, se deben tomar medidas para incrementarla, como la aplicación de materia orgánica o la aplicación de cal para subir el pH de los suelos ácidos; esto último para que los coloides de carga variable adquieran carga negativa. Además, en suelos de baja CIC debe evitarse hacer altas aplicaciones de nutrientes de carga positiva (amonio, potasio, magnesio, etc.) en una sola aplicación, debido a que mucho de los nutrientes aplicados no podrán ser retenidos por el suelo (por baja CIC, no hay cargas eléctricas negativas que los retengan) quedando en el agua del suelo expuestos a perderse por lavado. En este caso, es mejor hacer un número mayor de fertilizaciones y en pequeñas dosis.

2.2.2. Saturación de bases

La CIC nos indica la cantidad de cargas negativas en el suelo, pero no nos dice por qué elementos y en qué cantidad están siendo ocupadas. Para conocer esto, usamos los valores de ciertos índices. Uno de ellos es la "saturación de bases", que consiste en la suma de los cationes calcio, magnesio, potasio y sodio, dividida entre la CIC o CICE, según sea el caso, y multiplicada por 100 para obtener un porcentaje:

$$\text{Saturación de bases (\%)} = \frac{\text{calcio} + \text{magnesio} + \text{potasio} + \text{sodio}}{\text{CICE}} \times 100$$

2.2.3. Acidez intercambiable y saturación de aluminio

La acidez intercambiable y la saturación de aluminio nos indican qué proporción de la CIC o CICE está siendo ocupada por los elementos acidificantes del suelo, hidrógeno y aluminio.

$$\text{Acidez intercambiable (\%)} = \frac{\text{hidrógeno} + \text{aluminio}}{\text{CICE}} \times 100$$

$$\text{Saturación de aluminio (\%)} = \frac{\text{aluminio}}{\text{CICE}} \times 100$$

Significado de cmoles (+)/kg de suelo (se lee: centimoles carga por kg de suelo)

Un mol es la masa en gramos de 6.02×10^{23} átomos o moléculas (número de Avogadro). Debido a que no es posible medir la masa de un átomo o una molécula, los químicos han establecido una cantidad que pueda ser medible. Esa cantidad es $6.02 \times 10^{23} = 602\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000$ (602 000 trillones). En el caso de átomos: 1 mol de hidrógeno (H) pesa 1 g (ver la tabla periódica) y significa que en 1 g hay 6.02×10^{23} átomos de H. Un mol de calcio (Ca) pesa 40 gr, e indica que en 40 g hay 6.02×10^{23} átomos de Ca. En el caso de moléculas (compuestos de dos o más átomos), 1 mol de ácido fosfórico (H_3PO_4) pesa 98 gr, por lo que en 98 g hay 6.02×10^{23} moléculas de ácido fosfórico.

Moles carga: es la cantidad de masa de un átomo o molécula por cada electrón que este átomo o molécula cede o gana en la formación de compuestos. Se obtiene dividiendo el peso atómico o molecular de la sustancia entre su valencia.

Ejemplo: El calcio tiene un peso atómico de 40 g y generalmente cede 2 electrones cuando forma compuestos con otros átomos, por lo que su valencia es +2. Entonces,

$$\text{Mol carga de calcio: } \frac{\text{Peso atómico del calcio}}{\text{N}^\circ \text{ de electrones de valencia}} = \frac{40 \text{ g} = 20 \text{ gr}}{2}$$

Ejemplo: El cloro tiene un peso atómico de 35.5 g y normalmente gana 1 electrón cuando forma compuestos, por lo que su valencia es -1. Entonces,

$$\text{Mol carga de cloro: } \frac{\text{Peso atómico del cloro}}{\text{N}^\circ \text{ de electrones de valencia}} = \frac{35.5 \text{ g} = 35.5 \text{ gr}}{1}$$

1 centimol (cmol) es una centésima de mol.

1 mol (+) de calcio se obtiene con 20 g de calcio, por lo que 1 cmol (+): $20/100 = 0.2 \text{ g}$ o 200 mg.
1 mol (+) de cloro se obtiene con 35.5 g de cloro, por lo que 1 cmol (+): $35.5/100 = 0.350 \text{ g}$ o 350 mg.

En el caso de la capacidad de intercambio catiónico (CIC), los cmoles (+)/kg indican la capacidad del suelo de retener en sus coloides centimoles (+) de cualquier elemento iónico por kg de suelo. Por ejemplo, un suelo con una CIC de 10 cmoles carga/kg de suelo indica que puede retener 10 cmoles (+) de elementos catiónicos, como el calcio (Ca^{++}), el potasio (K^+), el amonio (NH_4^+), etc.

Numéricamente, centimoles (+)/kg de suelo es igual a miliequivalentes/100 g de suelo, medida usada antes para referirse a la CIC.

2.2.4. Capacidad de intercambio aniónico

Se refiere a la capacidad de los suelos de retener nutrientes, elementos o compuestos con carga negativa, como el nitrato (NO_3^-), ácido fosfórico (H_2PO_4^- y HPO_4^{2-}), sulfato (SO_4^{2-}), molibdato (MoO_4^{2-}), ácido bórico e hidróxido de boro (H_2BO_3^- y $\text{B}(\text{OH})_4^-$). En comparación con la CIC, esta es muy baja en los suelos, solo de algunos cmoles (+)/kg en los minerales que presentan mayor CIA (Navarro Blaya y Navarro García, 2003; Thompson, 1998).

Debido a esto, algunos de los nutrientes aniónicos son muy sensibles a perderse por lavado, como el nitrato. En general y como lo indican los textos, se presentará una relativa alta capacidad de intercambio aniónico: *i)* En derivados de la materia orgánica. *ii)* En los suelos que han estado expuestos por miles de años a los procesos de meteorización (descomposición de la roca o minerales por fuerzas físicas, como el clima, y fuerzas químicas), perdiéndose algunos de los componentes de los minerales de los suelos, como el silicio, quedando al final solo los minerales más duros de descomponer, como los óxidos de hierro y aluminio. *iii)* Suelos que en algún momento han recibido lava o cenizas volcánicas presentan coloides con mayor contenido de cargas positivas (alófano). *iv)* Suelos con presencia de coloides con cargas dependientes del pH presentarán una alta CIA, cuando el pH es muy ácido.

En el cuadro 6 se puede observar cómo la retención de nutrientes de carga negativa (aniones) se incrementa en la medida que el pH se reduce; esto como consecuencia del cambio de carga de estos coloides, que se vuelven positivas al acidificarse los suelos.

Cuadro 6. Retención de aniones en arcillas del suelo con carga dependiente del pH.

En cmoles/kg de suelo								
Oxisol				Inceptisol			Andosol	
pH	Cl^-	SO_4^{2-}	PO_4^{3-}	pH	Cl^-	PO_4^{3-}	pH	SO_4^{2-}
7,2	0	0	31,2	6,8	0	22,0	6,3	13
6,7	0,3	2	41,2	5,6	0	36,5	5,1	22
6,1	1,1	5,5	46,5	4,0	0,005	47,4	4,4	38
5,8	2,4	7,1	50,8	3,2	0,1	64,0	4,1	48
5,0	4,4	10,5	66,1	3,0	0,1	73,5		
4,0	6,0		88,2	2,8	0,4	100,0		

Fuente: Fassbender 1994.

2.3 Ejemplo de determinación de la fertilidad de un suelo mediante la CICE, la saturación de bases y la acidez intercambiable

Se enviaron muestras de suelo a un laboratorio para determinar su condición química. Como el suelo es de un lugar de las zonas altas de Honduras, de las cuales ya sabemos son de bajo pH (menores a 5.5) y, posiblemente, con alto contenido de coloides de carga variable, no se determinará la CIC, ya que los métodos de este laboratorio para obtenerla implican incremento en el pH de la muestra, lo que bajo las condiciones del suelo en estudio, nos dará una medida errada. Entonces, se acordó extraer las bases intercambiables (calcio, magnesio y potasio) y el aluminio con soluciones no tamponadas (sin alterar el pH), para, a partir de estas, determinar la CICE. En este caso, el calcio y magnesio y aluminio fueron extraídos con KCl y el potasio, con NH₄Cl. Conociendo que estos suelos son de muy bajo contenido de sodio, dado que los suelos de donde vienen las muestras están bajo un clima de mucha lluvia, no se trabajará con este elemento.

El resultado del análisis nos indica que el pH y los niveles de las bases intercambiables y la acidez en la muestra del suelo, en cmoles (+)/kg de suelo, fueron:

- pH: 4.8
- bases intercambiables: calcio = 2.0, magnesio = 1.0 y potasio = 0.01
- aluminio intercambiable= 3.0

A partir de estos datos podemos determinar la CICE, la saturación de bases y la acidez intercambiable. Las tablas de comparación usadas en este ejemplo parten de estudios desarrollados en Colombia. Solo deben ser tomadas como punto de partida, ante la falta de información desarrollada en el país.

2.3.1. ***CICE = calcio + magnesio + potasio + aluminio***

$$CICE = 2 + 1 + 0.01 + 3$$

$$CICE = 6.01 \text{ cmoles (+)/kg de suelo}$$

Cuadro 7. Rangos de comparación de la CICE* en cmoles (+)/kg suelo.

Clasificación	Niveles
Bajo	0 a 5
Medio	5.1 a 10
Alto	> 10

* CICE = calcio + magnesio + potasio + sodio + aluminio

Comentario sobre la CICE: Al comparar la CICE del suelo (6.01 cmoles/kg) con la tabla de comparación (cuadro 7), se ve que este se encuentra en un nivel medio. Aunque es un nivel en general aceptable, aún se puede mejorar, desarrollando medidas que potencien su capacidad de almacenamiento de nutrientes catiónicos. Un punto importante a tomar en cuenta es que el pH está muy bajo, 4.8, por lo que es posible que sus coloides de carga variable estén con carga positiva. Entonces, como primera medida, aplicaremos cal para subir el pH (los métodos para determinar las dosis de encalado se verán más adelante). También haremos aplicaciones de materia orgánica, ya que esta es fuente de coloides. Pero, mientras se mejora la CICE, las fertilizaciones de nutrientes catiónicos (como amonio, calcio, potasio, magnesio, etc.) se harán en pequeñas dosis, pero más frecuentemente para evitar pérdidas por lavado de los nutrientes aplicados. Esto, como ya se ha mencionado, porque al ser baja la CIC, hay pocos espacios de carga negativa donde los nutrientes de carga positiva o cationes puedan adherirse y mantenerse en la zona cercana a las raíces.

2.3.2. Saturación de bases intercambiables

Este índice nos indicará cuánto de las cargas negativas de este suelo (CIC o CICE) están siendo ocupadas por los nutrientes calcio, magnesio y potasio.

$$\text{Saturación de bases} = \frac{\text{calcio} + \text{magnesio} + \text{potasio}}{\text{CICE}} \times 100$$

$$\text{Saturación de bases} = \frac{2 + 1 + 0.01}{6.11} \times 100$$

Saturación de bases = 49.2 %

Cuadro 8. Rangos de comparación saturación de bases (%).

Clasificación	Niveles
Bajo	0 a 40
Medio	41 a 60
Bueno	61 a 80
Alto	> 80

Comentario sobre saturación de bases: al comparar la saturación de bases de este suelo con la tabla de comparación (cuadro 8), se observa que está a un nivel medio, y lo mejor es aumentarla. Para esto debemos determinar cuál o cuáles de los elementos que componen la saturación de bases (calcio, potasio y magnesio) se encuentran en un nivel bajo, como se presenta a continuación.

2.3.3. Concentración de calcio, magnesio y potasio

Niveles en cmoles/kg de suelo de: calcio = 2.0, magnesio = 1.0 y potasio = 0.01

Cuadro 9. Rangos de comparación del calcio en cmoles (+)/kg.

Clasificación	Niveles
Bajo	0.3
Nivel crítico*	2.2
Alto	> 4.0

* **Nivel crítico:** Nivel abajo del cual se espera respuesta de las plantas a la fertilización

Cuadro 10. Rangos de comparación del magnesio en cmoles (+)/kg.

Clasificación	Niveles
Bajo	0.12
Nivel crítico*	0.80
Alto	> 2

Cuadro 11. Rangos de comparación del potasio en cmoles (+)/kg suelo.

Clasificación	Niveles
Bajo	0.03
Nivel crítico	0.20
Alto	> 0.40

Comentario sobre los niveles calcio, magnesio y potasio: El calcio, con un nivel de 2.0 cmol (+)/kg, se encuentra un tanto abajo del nivel crítico (cuadro 9). Debido a esto, podemos esperar respuesta de las plantas a aplicaciones de este nutriente. El magnesio está en un nivel adecuado, 1 cmol (+)/kg, y es posible que los cultivos no muestren respuesta a aplicaciones de este elemento, por tanto podríamos prescindir de fertilizaciones con magnesio (cuadro 10). Al comparar el contenido de potasio en el suelo, 0.01 cmoles (+)/kg, con la tabla de comparación

(cuadro 11), se observa que este nutriente se encuentra en un nivel alarmantemente bajo. En definitiva se deberá aplicar potasio, ya que las posibilidades de respuesta por las plantas a la aplicación de este nutriente son muy altas.

2.3.4. Proporciones de calcio, magnesio y potasio

La importancia de las proporciones de las bases intercambiables en el suelo se basa en que, en general, los nutrientes de igual carga compiten por espacios en los coloides y en los puntos de absorción, teniendo mayor ventaja el elemento que esté en mayor cantidad. Aunque actualmente muchos autores recomiendan considerar las proporciones en el suelo de las bases intercambiables cuando se hacen planes de fertilización de los cultivos, parece ser que aún no hay suficiente evidencia experimental que sustente su beneficio para los cultivos, en especial en estudios de campo. Rehn (2009) se basa en la información de los cuadros 12 y 13 para rebatir la teoría. Los cuadros indican que los rendimientos del maíz, soya y alfalfa no son compatibles con las relaciones Ca:Mg. Los autores puntualizan que lo verdaderamente importante es llevar la concentración de los cationes en la rizósfera a niveles adecuados. Ellos indican que un suelo puede tener las proporciones adecuadas entre los cationes, pero aun así, estos pueden estar deficientes para las plantas. A esto se suman resultados de estudios más recientes, como el de Stevens *et al.* en 2005, quienes trabajando con algodón, encontraron que las relaciones Ca:Mg no afectaron los rendimientos.

Cuadro 12. Relación entre los cinco más altos y bajos rendimientos y las relaciones entre calcio, magnesio y potasio para dos cultivos.

Relación	Nivel de rendimiento	Rango de las relaciones			
		Maíz (1975)	Maíz (1976)	Soya (1977)	Soya (1978)
Ca:Mg	Cinco más altos	5,7 - 26,8	5,7 - 14,3	5,7 - 14,0	5,7 - 26,8
Ca:Mg	Cinco más bajos	5,7 - 21,5	5,0 - 16,1	2,3 - 16,1	6,8 - 21,5
Mg:K	Cinco más altos	0,6 - 3,0	1,3 - 3,1	1,0 - 3,0	1,1 - 3,1
Mg:K	Cinco más bajos	1,1 - 2,1	0,7 - 2,1	0,7 - 3,6	0,7 - 2,1

Fuente: Rehn 2009.

Cuadro 13. Efecto de las relaciones Ca:Mg y los rendimientos de la alfalfa en dos suelos de Wisconsin (Estados Unidos).

Relación Ca:Mg	Saturación en sitios de intercambio		Rendimiento t/acre
	Ca %	Mg %	
Suelo franco limoso			
2,28	34	35	3,32
3,40	45	22	3,31
4,06	46	19	3,40
4,76	49	17	3,40
5,25	52	16	3,50
8,44	62	12	3,22
Suelo franco arenoso			
2,64	32	20	4,14
2,92	35	20	4,28
3,48	38	18	4,35
4,81	43	15	4,12
7,58	65	13	4,30
8,13	68	15	4,35

Fuente: Rehm 2009.

No obstante, también hay estudios que indican una mejor respuesta productiva de los cultivos cuando las relaciones entre el calcio, magnesio y potasio se mantienen a cierto rango. Oliveira *et al.* (2001), trabajando con soya, encontraron que la mejor producción se obtuvo con relaciones $(Ca + Mg)/K$ entre 20:1 y 30:1. El menor rendimiento se obtuvo con la relación $(Ca + Mg)/K$ de 36:1. En maíz, Muñoz (1999) reporta que los mayores valores de peso seco y contenido de fósforo en tejido se presentaron con una relación Ca:Mg de 3:1.

Sin embargo, se dice que este efecto positivo de las relaciones entre las bases intercambiables encontrado en algunos estudios, puede deberse al efecto benéfico del incremento en el pH, cuando dichos estudios son hechos sobre suelos ácidos (Rehn, 2009). Otros argumentan que, a veces, las relaciones entre las bases intercambiables no funcionan en el campo debido a que algunos métodos de extracción en el laboratorio sustraen fracciones que, bajo condición natural, no son accesibles para las plantas, sobreestimando los contenidos para algunos elementos.

Para fines demostrativos, determinaremos y adecuaremos las proporciones entre calcio, magnesio y potasio en el suelo. No hay números absolutos que indiquen la mejor relación, estas varían entre cultivos, y de un experimento a otro. Si se van a considerar las proporciones entre las bases intercambiables en los planes de fertilización, se deberá consultar la bibliografía sobre la mejor proporción para el cultivo de interés.

Si se decide tomar en cuenta las relaciones entre las bases intercambiables, hay que considerar que los datos de concentración deben estar en forma de cmoles (+)/Kg de suelo. Siguiendo con el ejemplo anterior:

Proporción calcio/magnesio: $2/1 = 2.0$ Hay 2 de calcio por cada uno de magnesio. Lo recomendable es 3 a 5 de calcio por uno de magnesio (cuadro 14).

Proporción magnesio/potasio: $1/0.01 = 100$ Hay 100 de magnesio por uno de potasio. Lo recomendable es un máximo de 3.6 de magnesio por uno de potasio (cuadro 15).

Proporción (calcio + magnesio)/potasio: $3/0.01 = 300$. Hay 300 de (calcio + magnesio) por cada uno de potasio. Lo máximo recomendable es 60 (cuadro 16).

Cuadro 14. Rangos de comparación para la relación calcio/magnesio. Para la relación magnesio/potasio

Clasificación	Niveles
Bajo	0.5
Nivel crítico	3
Alto	> 5

Cuadro 15. Rangos de comparación

Clasificación	Niveles
Bajo	0.2
Nivel crítico	1.6
Alto	> 3.6

Cuadro 16. Rangos de comparación para la relación calcio + magnesio/potasio.

Clasificación	Niveles
Bajo	3.5
Nivel crítico	10
Alto	> 60

Comentario sobre las proporciones de calcio, magnesio y potasio: Comparando las proporciones entre calcio, magnesio y potasio en el suelo con las tablas de comparación, se observa que la relación calcio/magnesio está baja, y es notoria la gran desproporción entre la relación magnesio/potasio y la relación (calcio + magnesio)/potasio. Esto se debe a que el contenido de potasio de este suelo es muy bajo. Aplicaciones de potasio al suelo son indispensables si queremos obtener buenas producciones. Sin embargo, no se puede determinar aún la cantidad de potasio a aplicar debido a que todavía necesitamos analizar la condición de acidez y contenido de aluminio. Dependiendo de la acidez y aluminio, es posible que necesitemos aplicar cal y de ser así, las proporciones cambiarán, debido a que la cal va a aportar calcio al suelo y, con algunos tipos de cal, también magnesio.

2.3.5. Saturación de aluminio

$$\text{Saturación de aluminio} = \frac{\text{aluminio}}{\text{CICE}} \times 100$$

$$\text{Saturación de aluminio} = \frac{3}{6.11} \times 100$$

Saturación de aluminio = **49 %**

Cuadro 17. Rangos de comparación Saturación de aluminio (%).

Clasificación	Niveles
Bajo	0 a 20
Medio	21 a 30
Alto	31 a 40
Muy alto	> 40

Comentarios sobre la saturación de aluminio: El aluminio está en una proporción más allá de lo aceptable para la agricultura (< 20%). Dada la alta saturación de este metal, podemos considerar que está ocupando una gran proporción de los sitios con carga negativa del suelo, reduciendo el espacio para que los nutrientes catiónicos (calcio, magnesio, potasio, amonio, etc.) puedan adherirse y mantenerse cerca de las raíces de las plantas. Además, es de esperar que algunos cultivos sensibles al exceso de aluminio presenten limitado rendimiento, por ejemplo, el frijol común y la soya (Fagera *et al.*, 1988). Para desarrollar una agricultura rentable en este suelo será necesario reducir la concentración del aluminio. Esto se logra encalando o aplicando estiércoles a los suelos, lo cual se tratará más adelante.

3. EL PH DEL SUELO

3.1 Concepto

El pH significa potencial de hidrógeno (*pondus hydrogenii*) y nos da la concentración de hidrógeno en la solución del suelo. Este se mide en una escala que va de 1 a 14, donde siete es la mitad y significa un pH neutro (figura 10). Cuando el pH es neutro, el contenido de hidrógeno (H^+) en la solución del suelo es igual al contenido de hidróxidos (OH^-). Cuando el pH está por abajo de siete, el suelo es ácido y, en la medida que el pH desciende, el suelo se va volviendo aún más ácido. Cuando el pH está por arriba de siete, el suelo es alcalino o básico y se volverá más alcalino en la medida que el pH se incrementa.

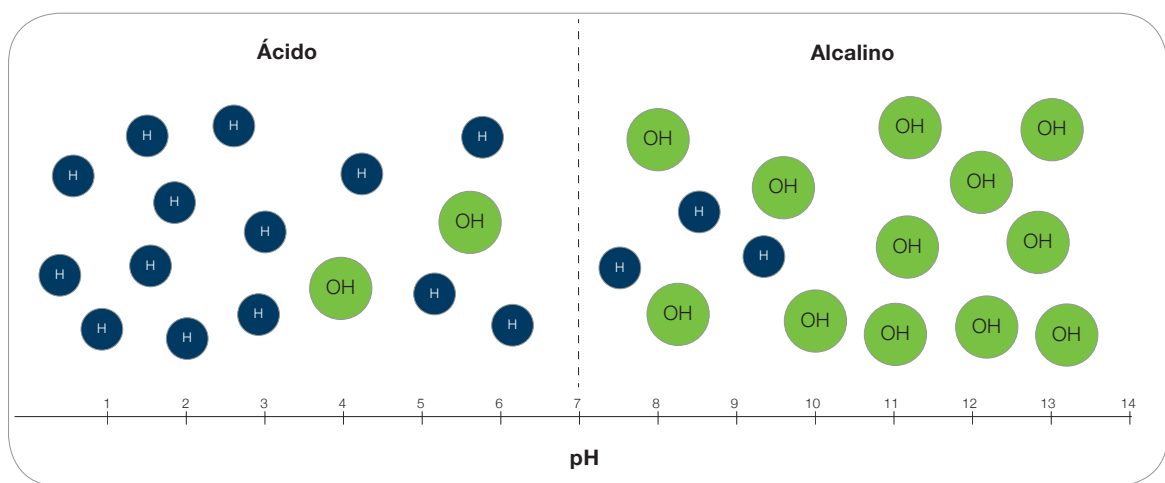


Figura 10. Esquemización del contenido de hidrógeno e hidroxilos de acuerdo con la escala de pH.

El pH es un importante índice para diagnóstico del estado de disponibilidad de los nutrientes para las plantas. Aunque las especies de plantas cultivadas tienen ciertas diferencias en cuanto al pH en que se desarrollan mejor, se acepta que, en general, habrá mayor disponibilidad de nutrientes para las plantas a pH del suelo entre 6.0 y 7.0 (figura 11).

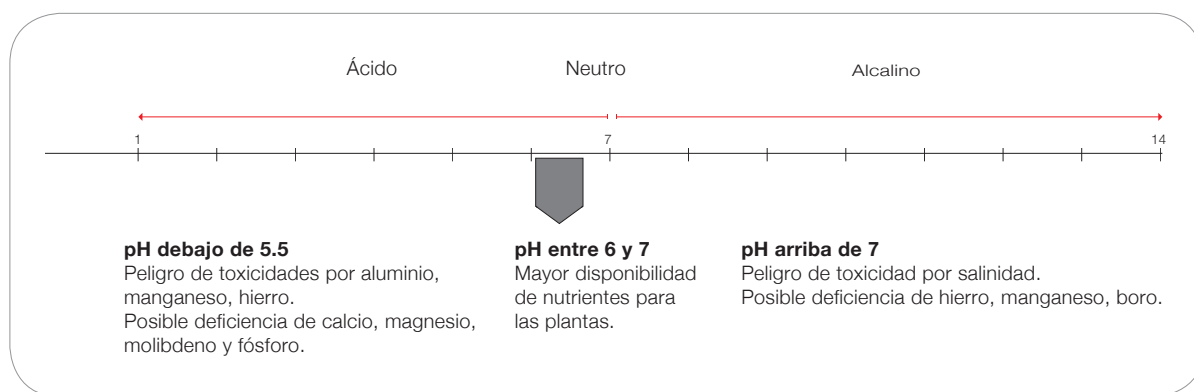


Figura 11. pH del suelo y la disponibilidad de nutrientes para las plantas.

pH ácido

Cuando el pH se reduce por debajo de 5.5, los niveles de acidez son tan altos que nutrientes como el calcio, magnesio, molibdeno y fósforo pueden no estar tan disponibles para las plantas, las que sufrirán deficiencia nutricional. Además, algunos nutrientes y otros elementos del suelo llegan a volverse tóxicos para las plantas como el hierro, aluminio y manganeso. Además y en el caso de muchos de los suelos tropicales con altos contenidos de coloides de carga variable, la acidez puede causar pérdidas de nutrientes catiónicos (como el calcio, magnesio, potasio, amonio) por lavado ya que bajo esta condición de acidez muchos de los coloides de los suelos se vuelven de carga positiva, siendo incapaces de retener los nutrientes de carga positiva o cationes (debido a que las cargas iguales se repelen).

pH alcalino o básico

En la medida en que el pH se incrementa por arriba de 7, volviéndose más alcalino, la disponibilidad de nutrientes como hierro, zinc, boro, manganeso y fósforo se reduce, limitándose fuertemente el crecimiento de las plantas.

El fósforo es especialmente afectado por la condición del pH del suelo. Este nutriente es más aprovechado por las plantas cuando el rango del pH está entre 6 y 6.5 (Tisdale *et al.*; 1985). Por arriba y por debajo de este rango, gran proporción del fósforo forma compuestos no absorbibles por las plantas con elementos como el aluminio, hierro, manganeso y zinc (cuando el pH es ácido) y con calcio (cuando el pH es alto). Esto causa que, para lograr que las plantas absorban algo de este nutriente, se tengan que hacer altas aplicaciones de fertilizantes fosfóricos, lo que viene a encarecer mucho los cultivos sembrados en suelos con el pH fuera del rango adecuado.

3.2 Métodos de medición del pH

1. **En agua:** con este método se obtiene la acidez del agua o solución del suelo y para una mayor confiabilidad, se requiere que las muestras se obtengan de lugares que no han sido fertilizados recientemente. Este método se encuentra sujeto a variaciones estacionales, pudiendo dar una medida más baja en la época seca.
2. **En KCl:** este método mide el hidrógeno y el aluminio retenido en los coloides (acidez potencial). A diferencia del pH en agua, este método es independiente de la presencia de fertilizante en las muestras.
3. **En CaCl₂:** al igual que el KCl, es poco afectado por la presencia de fertilizante en las muestras y su medida puede ser menor a la del pH en agua.

Hay que considerar que los resultados de pH varían de un método a otro, por lo que cuando se reciben resultados de análisis químico de suelo, se debe pedir que indiquen el método de medición usado. No se pueden comparar los resultados obtenidos mediante agua con tablas desarrolladas para comparar el resultado con KCl. Generalmente, cuando no se menciona el método, se considera que se ha determinado mediante agua. En el cuadro 18 se presenta una comparación entre el pH obtenido mediante agua y KCl.

Cuadro 8. Lecturas de pH obtenidos mediante agua y KCl en suelos venezolanos.

Suelo	pH (Agua)	pH (KCl)
Algarrobo	8.0	7.6
Barlovento	7.8	7.5
Sta. Bárbara	5.7	4.6
Sta. Fe	7.9	7.4

Fuente: Vallejo y López 1988.

3.3 Causas de la acidez de los suelos

Uno de los factores de mayor importancia que causa acidez en los suelos, es la lluvia. El peso de la capa de agua dejada por una fuerte lluvia, hace que esta atraviese el suelo hasta estratos profundos para, finalmente, depositarse en algún acuífero subterráneo. Esta capa de agua arrastra consigo nutrientes del suelo, en especial nutrientes catiónicos como el calcio, magnesio y potasio. Estos espacios dejados por los nutrientes son ocupados por hidrógeno (que también tiene carga positiva, H^+), muchos de los cuales provienen directamente del agua o de reacción química, que se dan en el interior del suelo (por ejemplo, cuando el dióxido de carbono reacciona con el agua se libera hidrógeno). Este hidrógeno que queda paulatinamente va volviendo el suelo ácido. Cuando hay mucho hidrógeno, algunos de estos entran a la parte sólida de las arcillas, a su estructura, donde desplazan y reemplazan al aluminio, componente estructural de las arcillas (Besiaín, 1985). Al final, todo este aluminio reemplazado va al agua del suelo, donde es absorbido por las plantas, mientras que otra parte se pega a los espacios con carga negativa de los coloides (el aluminio tiene carga positiva, Al^{+3}), dejados por los nutrientes catiónicos lavados por el agua.

En la medida en que esto ocurre, el suelo se va acidificando más, favoreciendo el proceso de liberación de aluminio, hasta el punto de que este es tan alto, que resulta tóxico para las plantas; además de que, junto con el hidrógeno, ocupan los espacios negativos de los coloides, echando los nutrientes catiónicos al agua, perdiéndose al ser arrastrados por el agua. En el cuadro 19 se presenta el contenido de calcio en suelos bajo diferentes condiciones climáticas.

Cuadro 19. Contenidos de calcio en suelos desarrollados bajo diferentes climas.

	Clima		
	Tropical húmedo	Templado	Árido
Tipo de suelo	Oxisol	Molisol, Alfisol	Aridisol
Calcio (%)	0.5	1.0	5.0

También, cuando el pH del suelo se vuelve muy ácido, debajo de 5.5, en muchos suelos la solubilidad de manganeso se incrementa tanto, que daña las plantas por toxicidad.

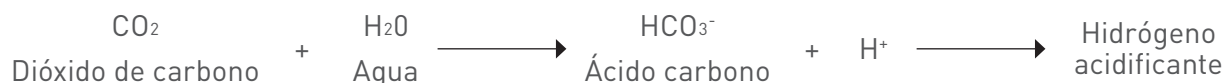
Este es un proceso más acelerado en muchos de los suelos del trópico húmedo, debido a los largos períodos de lluvia (de cuatro a seis meses). Después de muchos años bajo esta condición, se desarrollan suelos infértiles, con fuerte acidez, concentraciones tóxicas de aluminio y manganeso y además, deficientes en nutrientes esenciales para las plantas.

Ionización

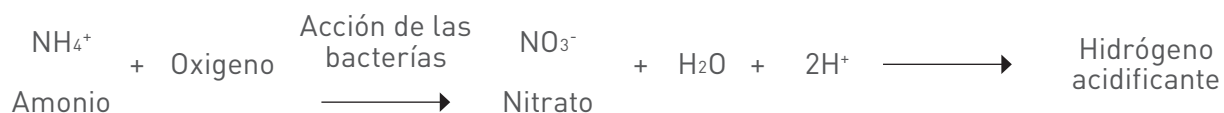
Ionización se le llama al proceso por el cual algunos compuestos se dividen en los elementos que lo componen, quedando estos elementos libres y con carga eléctrica; por ejemplo, cuando la sal (NaCl) es echada en agua, la molécula de NaCl se separa, quedando en el agua átomos de Na⁺, por un lado, y átomos de Cl⁻, por otro. A estos átomos se les llama iones debido a que tienen sus cargas eléctricas desneutralizadas (El Na⁺ con una carga positiva más y el Cl⁻ con una carga negativa de más). Cuando los elementos están en forma iónica se dice que son reactivos o inestables, debido a que pueden formar compuestos con otros elementos de diferente carga eléctrica. Cuando los elementos o compuestos tienen sus cargas eléctricas neutralizadas (igual número de cargas positivas y negativas), se dice que son estables.

Otros procesos que acidifican los suelos (Domenech, 2006)

1. Cuando las plantas absorben nutrientes catiónicos (amonio, calcio, magnesio, potasio, hierro, zinc, etc.) liberan hidrógenos, para mantener el equilibrio de carga interna. Estos hidrógenos acidifican el suelo.
2. Cuando el dióxido de carbono (CO₂), sustancia que está siempre presente en el suelo y el aire, hace contacto con el agua del suelo se forma ácido carbónico (HCO₃⁻) y se libera hidrógeno.



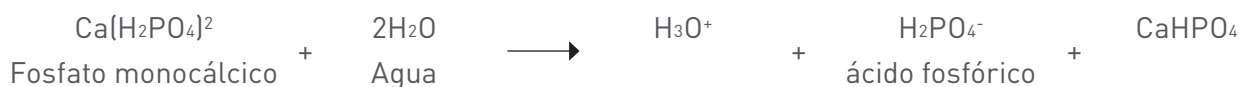
Algunos de los fertilizantes usados en la agricultura acidifican el suelo (cuadro 20). Fertilizantes que contienen amonio, como el nitrato de amonio y sulfato de amonio, o que ya en el suelo se convierten en amonio, como la urea; liberan hidrógeno acidificante cuando este amonio es transformado a nitrato por los microorganismos. Esto mismo ocurre cuando se libera amonio a partir de la materia orgánica.



El azufre en su forma elemental (S) cuando es aplicado al suelo se convierte en sulfato (SO₄⁻²) y se libera hidrógeno. No habrá acidificación cuando se aplica el azufre en forma de sulfato (SO₄⁻²).



La aplicación al suelo del fertilizante superfosfato triple [que contiene fosfato monocalcico, Ca(H₂PO₄)] causa una fuerte acidificación del suelo alrededor del fertilizante, debido al ácido fosfórico que se libera, haciendo que elementos como el aluminio, hierro y manganeso multipliquen su disponibilidad, causando toxicidad a las plantas.



Cuadro 20. Efecto de algunos fertilizantes sobre el pH del suelo.

Fertilizantes	Cantidad de cal (CaCO ₃) en lb* para neutralizar la acidez de un qq** del fertilizante aplicado
Acidificantes	
Sulfato de amonio	110
Fosfato diamónico (18-46-0)	70
Nitrato de amonio	60
Fosfato monoamónico (11-52-0)	59
Neutrales	
Cloruro de potasio	0
Sulfato de potasio	0
Sulfato de calcio (yeso)	0
Alcalinizantes	
	Cantidad equivalente en cal (CaCO₃) por qq del fertilizante aplicado
Nitrato de calcio	20
Nitrato de potasio	23
Nitrato de sodio	29

* kg = 2.2046 lb

** qq = quintal (100 lb o 45.45 kg)

Fuente: Lorenz y Maynard 1980.

El aluminio, al caer a la solución del suelo, reacciona con el agua (hidrólisis), liberando hidrógeno al suelo. Las reacciones son las siguientes:



Además, estos hidróxidos de aluminio (Al(OH)^{+2}), cargados positivamente, se adhieren a los espacios cargados negativamente de los coloides, quitando espacios que podrían ser ocupados por nutrientes catiónicos. También, estos hidróxidos de aluminio con carga positiva pueden formar compuestos con nutrientes aniónicos (HPO_4^{-2} , H_2PO_4^- , SO_4^{-2} , MoO_4^{-2} , Cl^- , NO_3^-) volviéndolos no disponibles para las plantas.

3.4 Las toxicidades del aluminio y manganeso en suelos ácidos

En suelos con presencia alta de aluminio, manganeso o hierro y con pH debajo de 5.5, se pueden presentar daños a los cultivos por toxicidad de cualquiera de estos elementos. Y cuando el pH llega a niveles por debajo de 4.0, se darán también daños a los cultivos por exceso de hidrógeno (Fassbender, 1994; Barber, 1995; Vitorello, 2005; Vlamis, 1973; Rout, 2001; El-Jaoul, 1998).

Las plantas intoxicadas no desarrollan bien sus raíces, especialmente cuando la toxicidad es por aluminio (figura 12), y son afectados procesos metabólicos importantes para el adecuado desarrollo y producción de las plantas, como la reducción de la replicación del ADN, la reducción de la respiración de raíces, la interferencia en la absorción, el transporte y uso de varios nutrientes esenciales, como el calcio, magnesio, fósforo y nitrato. A raíz de esto, las plantas se debilitan mucho y se vuelven muy sensibles a los fitopatógenos (Teusscher, 1965; Fassbender, 1994; Vlamis, 1973; Salas, 1996; Donahue *et al.*, 1981; Gupta, 1973; López, 1980; Rout, 2001; McGrath y Rorison, 1982; El-Jaoual y Cox, 1998).

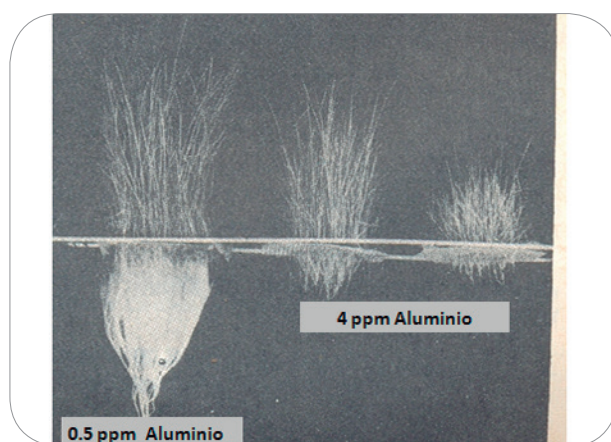


Figura 12. Plantas de trigo crecidas bajo diferente concentración de aluminio. Las plantas de la derecha presentan pobre desarrollo de las raíces, como consecuencia del exceso de aluminio.

Fuente: Donahue *et al.*, 1981.

En la mayoría de los suelos agrícolas de la zona alta de Intibucá, hay altos contenidos de aluminio y manganeso y excesiva acidez, como se muestra en el cuadro 21. En la figura 13 se puede ver como plantas crecidas en el suelo de Santa Catarina, Intibucá, presentaron rendimientos muy por debajo a las plantas crecidas en un sustrato comercial, evidenciando cómo la condición química actual de estos suelos limita la producción agrícola.

Cuadro 21. pH y contenido de algunos elementos en suelos de la zona alta de Intibucá y otros.

Lugar	Año	pH	Ca* ppm	Mg ppm	Mn ppm	Al cmoles(+)/ kg
Sta. Catarina, Intibucá	2001	4.0	520 B**	76 B	44 A	1.89 A
Sta. Catarina, Intibucá	2006	4.8	890 B	142 B	51 A	0.12 N
Sta. Catarina, Intibucá	2005	5.1	1010 B	56 B	9 N	1.55 A
Sta. Catarina, Intibucá	2001	4.0	520 B	76 B	44 A	1.89 A
Sta. Catarina, Intibucá	2003	4.8	610 B	100 B	49 A	0.55 N
Sta. Catarina, Intibucá	2007	5.4	860 B	166 B	25 A	0.8 N
Sta. Catarina, Intibucá	2007	5.4	220 B	60 B	21 A	3.44 A
Lajas, Intibucá	2006	4.8	1020 B	213 N	67 A	0.15 N
Lajas, Intibucá	2007	4.2	215 B	73 B	7 N	6.0 A
Pueblo Viejo, Intibucá	1996	5.0	4701 B	79 B	60 A	-
El Tabor, Intibucá	2007	4.8	530 B	100 B	53 A	1.80 A
El Pelón, Intibucá	2007	4.6	240 B	59 B	1.3 B	2.15 A
Los Encinos, Intibucá	2007	4.5	840 B	126 B	68 A	0.20 N
Los Encinos, Intibucá	2007	4.2	230 B	90 B	79 A	0.13 N
Guise, Intibucá	2010	5.0	680 B	120 B	47 A	0.15 A
Cabañas, La Paz	2015	4.3	330 B	48 B	21 A	1.75 A
Cabañas, La Paz	2015	5.2	400 B	52 B	5 N	0.40 N
Opatoro, La Paz	2012	5.0	950 B	162 B	70 A	0.40 N
Tatumbla, Fco. Morazán	2012	4.9	1130 M	145 B	49 A	0.50 N
Sumpul, Ocotepeque	2012	5.7	2850 M	366 A	11 A	0.30 N

* Contenido normal de acuerdo con el laboratorio de la FHIA:

pH: 6 – 7 (en agua, 1/2.5)

Calcio (Ca): 1000 – 6000 ppm (acetato de amonio 1 N a pH 4.8)

Magnesio (Mg): 180 – 250 ppm (acetato de amonio 1 N a pH 4.8)

Manganeso (Mn): 2 – 10 ppm (acetato de amonio 1 N a pH 4.8)

Aluminio (Al): < 1 cmol (+)/kg (KCl 1 N)

** A: Alto; N: Normal; B: Bajo

Fuente: FHIA.



Figura 13. Producción de plantas de papa crecidas en diferentes sustratos, pero fertilizadas con la misma cantidad de solución nutritiva en Santa Catarina, Intibucá.

Fuente: Toledo (2012).

3.5 Corrección del exceso de aluminio en el suelo

Hay dos formas, económicamente viable para los agricultores, de reducir el exceso de aluminio en los suelos: mediante la aplicación de cal o mediante la aplicación de estiércoles.

3.5.1. Corrección de la acidez y exceso de aluminio mediante el encalado

El encalado es una de las soluciones al problema de la excesiva acidez y toxicidades del suelo. El encalado permite elevar el pH del suelo debido a que el calcio, presente en la cal (carbonato de calcio: CaCO_3), desplaza el aluminio e hidrógeno presentes en los coloides, los que, una vez desplazados a la solución del suelo, reaccionan con el carbonato para formar compuestos lixiviables y no dañinos a las plantas (figura 14).

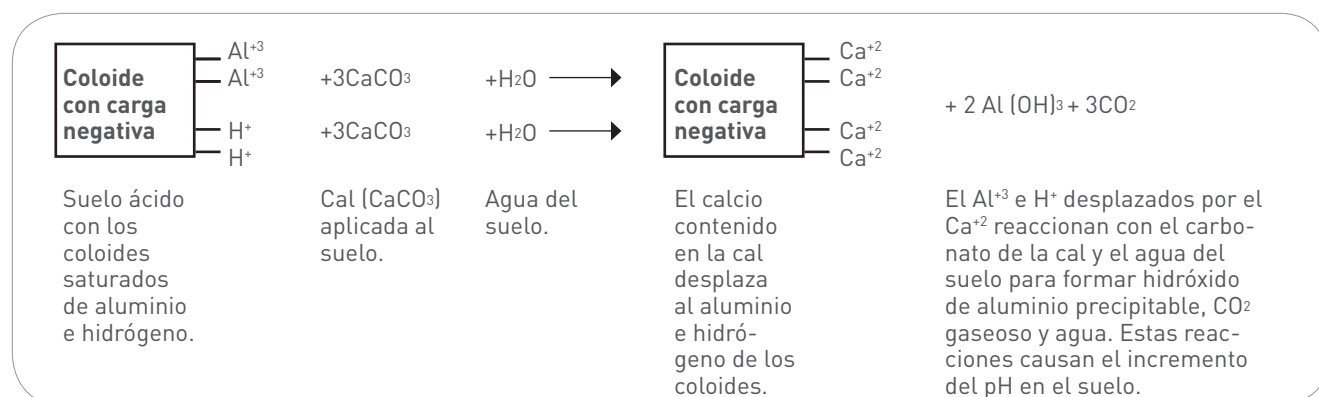


Figura 14. Representación del efecto del encalado sobre la acidez del suelo.

Determinación de la dosis de cal en suelos tropicales

Hay varios métodos para la determinación de la cantidad de cal a aplicar al suelo, y el uso de estos dependerá del lugar donde se ubique el suelo a enmendar. En los suelos de las zonas templadas, el cambio en el pH del suelo es más o menos proporcional a la cantidad de cal aplicada, como se observa en el cuadro 22.

Cuadro 22. Cantidad de cal (CaCO₃) necesaria para cambiar el pH en suelos de zona templada.

Cambio de pH deseado	Cal qq/ha	Cal qq/mz
	Suelo franco arcilloso	
4,0 a 6,5	247	173
4,5 a 6,5	207	145
5,0 a 6,5	163	114
5,5 a 6,5	114	80
6,0 a 6,5	59	41

Fuente: Lorenz y Maynard 1980.

Esto no es así en suelos del trópico, ya que en estos suelos la respuesta del pH al encalado es tardía; en ocasiones lleva años lograr cambios significativos (después de sucesivos encalados). En el cuadro 23 se observa cómo el nivel del pH se movió muy poco, a pesar del encalado, en tres suelos de la zona alta de Intibucá.

Cuadro 23. Efecto del encalado* sobre el pH (en agua 1:2.5) en tres suelos de la zona alta de Intibucá. La Esperanza, Intibucá. Honduras.

Origen de las muestras	pH inicial	pH final a 90 días del encalado		
		2 t/ha CaCO ₃	4 t/ha CaCO ₃	8 t/ha CaCO ₃
Sta. Catarina	5.4	5.4	5.8	5.8
El Pelón	4.6	4.8	5.0	5.4
El Tabor	4.8	4.8	5.0	5.0

* Fuente de encalado: Nutrical (28 % calcio, 6 % magnesio y 16 % sulfato).

Fuente: Toledo 2007a.

Esto es así debido a que, en la medida que el encalado neutraliza el hidrógeno presente en el agua del suelo, más hidrógeno se desprende de los coloides saturados de hidrógeno (acidez potencial). Se considera que el hidrógeno adherido a los coloides es 50 veces mayor de lo que hay en la solución (Donahue *et al.*, 1981). Suelos con una alta CIC (mayor contenido de cargas negativas) como los arcillosos, o con alto contenido de materia orgánica, retienen gran cantidad de hidrógeno en sus coloides, por lo que es más tardado lograr cambios en el pH y requerirá mayor cantidad de cal, que suelos con baja CIC (suelos arenosos). Por otro lado, a diferencia de los suelos de las zonas templadas, en los suelos tropicales la acidez está fuertemente influenciada por el aluminio, ya que este metal provoca que más aluminio se libere a la solución (Sánchez, 1985). Debido a esto, en esta región el encalado debe hacerse, en primer lugar, para neutralizar el aluminio y, en segundo lugar y si no hay presencia excesiva de aluminio, para elevar los niveles de calcio. La cal es efectiva para neutralizar el aluminio disuelto en el suelo. En el cuadro 24 se puede observar cómo en un período tan corto (30 días), el nivel del aluminio se redujo significativamente por efecto del encalado en tres suelos de la zona alta de Intibucá.

Cuadro 24. Efecto de varios niveles de encalado* sobre el contenido de aluminio (KCl 1 N) en tres suelos de la zona alta de Intibucá (cmoles (+)/ kg de suelo). La Esperanza, Intibucá, Honduras.

Origen de las muestras	Contenido inicial de aluminio en suelo	Contenido de aluminio a 30 días del encalado		
		2 t/ha CaCO ₃	4 t/ha CaCO ₃	8 t/ha CaCO ₃
Sta. Catarina	0,8	0,2	0,1	0,05
El Pelón	2,15	1,6	0,75	0,2
El Tabor	1,8	1,7	0,6	0,3

* Fuente de encalado: Nutrical, con 28 % de calcio y 6 % de magnesio.

Fuente: Toledo 2007a.

Determinación de las dosis de cal en los suelos tropicales

Algunos autores han desarrollado ecuaciones que permiten determinar la dosis de cal a aplicar con base en el contenido de aluminio del suelo y que pueden ser usadas para determinar las dosis de cal en suelos ácidos del trópico. A continuación se presentan algunas de ellas.

1. La desarrollada por Sánchez (1980)
 - a) Cultivos muy susceptibles:
t CaCO₃/ha = cmoles (+)/kg de aluminio en suelo x 2
 - b) Cultivos menos susceptibles:
t CaCO₃/ha = cmoles (+)/kg de aluminio en suelo x 1.5
 - c) Suelos orgánicos (> a 20 % de materia orgánica)
t CaCO₃/ha = cmoles (+)/kg de aluminio en suelo x 3
2. La desarrollada por Sánchez y Salinas (1983)

t CaCO₃/ha de cal = cmoles (+)/kg de aluminio x 1.65 Si la materia orgánica < 7 %
t CaCO₃/ha de cal = cmoles (+)/kg de aluminio x 2.3 Si la materia orgánica > 7 %
3. La de Cochrane (1984)

t/ha de CaCO₃ = 1.8 x aluminio en suelo - [RAS (aluminio + calcio + magnesio)/100]
 Donde: - aluminio en cmoles (+)/kg de suelo
 - ras = porcentaje crítico de aluminio

Cuadro 25. RAS para algunos cultivos.

Cultivo	Máxima concentración de aluminio en suelo recomendado (%)	Cultivo	Máxima concentración de aluminio en suelo recomendado (%)
Maíz	< 25	Plátano	< 25
Frijol	< 20	Yuca	< 60
Papa	< 20	Camote	< 20
Café	< 25	Soya	< 10
Cacao	< 20	Sorgo	< 20
Piña	< 30	Mango	< 20
		Banano	< 15

No obstante y debido a la amplia variación de los suelos y el clima en el trópico, la mejor ecuación es aquella desarrollada para la zona específica donde se usará, y que se logra asociando el método de extracción del laboratorio y la respuesta del suelo al encalado obtenido mediante pruebas de campo. En este sentido, en 2007, la Fundación Hondureña de Investigación Agrícola (FHIA) desarrolló una ecuación para determinar la dosis de cal para suelos de la zona alta de Intibucá, determinando el contenido de aluminio en el suelo mediante KCl 1 N.

$$\text{t/ha CaCO}_3 = [(\text{aluminio en suelo} - 0.75)/\text{aluminio en suelo}]^2 * 10 \text{ (Toledo, 2007a)}$$

Ejemplo de cómo determinar las necesidades de encalado

Siguiendo el ejemplo anterior, usado para explicar la CIC, se tiene el mismo suelo de la zona alta de Intibucá con las siguientes características químicas (en cmoles (+)/kg):

- pH: 4.8
- Bases intercambiables: calcio = 2.0, magnesio = 1.0 y potasio = 0.01
- Acidez intercambiable = aluminio = 3.0, hidrógeno = 0.1

Como ya se determinó en la explicación de la CIC, el aluminio en este suelo está en una concentración muy alta, ocupando la mitad de los espacios de carga negativa del suelo. Necesitamos determinar la cantidad de cal a aplicar para neutralizar el efecto dañino del aluminio. Para esto usamos la ecuación:

$$\text{t/ha CaCO}_3 = [(\text{aluminio en suelo} - 0.75)/\text{aluminio en suelo}]^2 * 10$$

$$\text{t/ha CaCO}_3 = [(3 - 0.75)/3]^2 * 10$$

$$\text{t/ha CaCO}_3 = [(2.25)/3]^2 * 10$$

$$\text{t/ha CaCO}_3 = [0.75]^2 * 10$$

$$\text{t/ha CaCO}_3 = 0.5625 * 10$$

$$\text{t/ha CaCO}_3 = 5.6$$

Para reducir el exceso de aluminio de este suelo se deberá aplicar cal en dosis de 5.6 t/ha. Este resultado está dado con cal en forma de carbonato de calcio (CaCO₃); ahora debemos hacer la conversión a cal comerciable en la zona alta de Intibucá. Para esto, es necesario conocer el equivalente químico de la cal a usar, como se observa en el cuadro 26.

Cuadro 26. Materiales encalantes y su equivalente en carbonato de calcio.

Material	Cantidad del material en lb para obtener 100 lb de carbonato de calcio (CaCO ₃)	Contenido de calcio	Contenido de magnesio
Cal dolomítica	93	21 %	13 %
Cal viva (óxido de calcio)	55	71 %	0
Hidróxido de calcio	72	54 %	0
Hidróxido de magnesio	58	0	41 %
Carbonato de magnesio	84	0	28 %
Óxido de magnesio	40	0	60 %
Nutrical*	140	28 %	6 %

Fuente: Molina, 1998, excepto Nutrical*Tomado de Toledo, 2007a. Esta cal, además, contiene 16 % de sulfato (SO₄).

Equivalente en cal dolomítica

Como se puede observar en el cuadro 26, 100 lb de carbonato de calcio se obtienen con 93 lb de cal dolomítica, entonces:

$$\text{Cantidad de cal dolomítica} = 5.6 \text{ t/ha} \times 93/100 = \underline{5.2 \text{ t/ha}} \text{ (80 qq/mz)}$$

Equivalente en cal viva (óxido de calcio).

Hay que tomar en cuenta que esta cal no aporta magnesio al suelo, como lo hace la cal dolomítica.

En el cuadro 26 se observa que 100 lb de carbonato de calcio se obtienen con 55 lb de cal viva, entonces:

$$\text{Cantidad de cal viva} = 5.6 \text{ t/ha} \times 55/100$$

$$\text{Cantidad de cal viva} = \underline{3 \text{ t (66 qq)/ha}} \text{ o } 46 \text{ qq/mz}$$

Equivalente en cal apagada (hidróxido de calcio).

Esta cal tampoco le aporta magnesio al suelo.

100 lb de carbonato de calcio se obtienen con 72 lb de cal apagada, entonces:

Cantidad de cal apagada = $5.6 \text{ t/ha} \times 72/100$

Cantidad de cal apagada = 4 t (88 qq)/ha o 62 qq/mz

Cuidado con el sobre encalamiento

Cuando se hacen aplicaciones altas de cal (arriba de 2 t/ha) es necesario considerar cómo quedarán las proporciones entre calcio, magnesio y potasio después del encalado, como ya fue explicado y ejemplificado antes, ya que un sobre encalado puede provocar deficiencia de magnesio y potasio en las plantas. En Colombia, se ha visto que aplicaciones de cal superiores a las 4 t/ha provoca disminución en los rendimientos del cultivo de la papa (Muñoz, 1998). En este caso, no se indica el estado de las proporciones entre calcio, magnesio y potasio después de los encalados con las diferentes dosis. Es posible que esto se deba a una fuerte desproporción entre las bases intercambiables, después del encalado. También, el mismo autor indica que se han obtenido iguales resultados aplicando la cal únicamente al fondo del surco de siembra, en el caso de la papa, ahorrando hasta un 50 % de cal. Si el encalado se hace de esta forma, es necesario tapar la cal con una capa de suelo para separarla del fertilizante, si el fertilizante se va a aplicar al fondo del surco.

Bajo la condición actual de la zona alta de Intibucá, recomendamos aplicar la dosis requerida de cal y esparcirla uniformemente en toda la superficie del suelo a enmendar.

Tipos de material encalante

Carbonato de calcio (CaCO_3). A este material se le denomina “caliza” y tiene un equivalente de óxido de calcio (CaO) entre 24 % y 38 %. Se obtiene a partir de las rocas calizas, de la cual forma parte en proporciones entre 60 % y 96 %. El producto empacado puede llevar cierto grado de impurezas como arena, limo y arcilla.

Óxido de calcio (CaO). Se le denomina “cal viva” y se obtiene calcinando el carbonato de calcio. Es uno de los materiales más usados para encalar, debido a su mayor velocidad de reacción. Tiene un alto contenido de calcio, hasta 71 %, sin embargo, su manejo debe hacerse con cuidado, ya que puede causar quemaduras a la piel.

Hidróxido de calcio [$\text{Ca}(\text{OH})_2$]. Se le denomina “cal apagada” y se obtiene hidratando la cal viva. Por lo general, tiene un contenido del 95 % de óxido de calcio (CaO). Su velocidad de reacción es un tanto menor que el de la cal viva, aunque mucho mayor que el de la caliza.

Cal dolomítica [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$]. Este material contiene alrededor de 21 % de calcio y 13 % de magnesio. Tiene una velocidad de reacción menor al carbonato de calcio. Sin embargo, tiene la ventaja de suplir magnesio, lo cual es ventajoso si vamos a usarlo en los suelos de la zona alta de Intibucá, donde la mayoría de los suelos son también deficientes en magnesio. En Honduras existen yacimientos de cal dolomítica, cerca de Potrerillos, Cortés, al norte de Honduras, por lo que es encontrado fácilmente en el comercio.

Silicatos de calcio (CaSiO_3). Este es un producto residual de la industria del hierro y se le denomina escoria de horno. Tiene la misma capacidad para neutralizar la acidez que el carbonato de calcio (caliza).

Espumas azucareras. En el proceso de fabricación del azúcar se purifican los jugos extraídos con adiciones de cal. El subproducto resultante contiene 14 % a 32 % de carbonato de calcio (con 6 a 15 % de óxido de calcio), además de ácido fosfórico, magnesio y trazas de nitrógeno y potasio.

Magox (óxido de magnesio). Este material está compuesto solo por magnesio (60 %) obtenido a partir de la roca magnesita. Además de ser fuente de magnesio, es ideal para usarse como enmienda para mejorar los suelos ácidos, ya que tiene una capacidad de neutralización de la acidez alta. Se considera que el poder neutralizante del MgO es 19 puntos mayor que el CaCO_3 , por lo que si el CaCO_3 tiene 100 % de poder neutralizante, el del MgO es del 119 %.

Yeso agrícola o sulfato de calcio ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Se obtiene a partir de yacimientos (evaporita) o como subproducto de la industria de los fertilizantes fosfatados. Contiene entre 17 % y 20 % de calcio y de 14 % a 18 % de azufre. Este material, además de reducir los niveles de aluminio e incrementar el contenido de calcio y sulfato en los suelos, la evidencia experimental indica que, a diferencia de la cal, tiene efecto directo en la reducción del manganeso en el suelo (Hue *et al.*, 2001).

Material más apropiado para el encalado

La capacidad de un material para corregir la acidez del suelo dependerá de su finura y el contenido de calcio y/o magnesio; de hecho, un material encalante se considera de buena calidad si tiene un contenido equivalente de carbonato de calcio del 80 % en adelante.

Los materiales cuyo ingrediente son el óxido e hidróxido de calcio y magnesio son más efectivos en neutralizar la acidez. Además, cuanto más fino y mayor contenido de calcio y magnesio tenga, más rápida será su reacción en el suelo. De todos los materiales antes mencionados, los que tienen menor velocidad de reacción son el silicato de calcio, la cal dolomítica y la calcita (carbonato de calcio). Sin embargo, bajo la condición actual de los suelos de las zonas altas de Honduras, es recomendable aplicar cal dolomítica, ya que esta actúa muy eficientemente, neutralizando el aluminio (en un tiempo máximo de un mes), además de que aporta calcio y magnesio, ambos nutrientes muy deficientes en esos suelos.

Otros conceptos a tomar en cuenta:

- 1) Equivalente químico. Se refiere a la capacidad neutralizante de todos los materiales encalantes en comparación con el carbonato de calcio, dándole a este último el valor de 100 %. Este término sirve para lograr el entendimiento en lo que respecta a las dosis de encalado, de forma que estas siempre se dan en cantidades de carbonato de calcio y este término es entendido alrededor del mundo y cada quien hace la respectiva conversión, de acuerdo con el contenido de carbonato de calcio del material que se planea usar.

Por ejemplo, si se recomienda una dosis de encalado de 4 t/ha de carbonato de calcio, usando los datos del cuadro 25, podemos hacer la conversión de acuerdo con los materiales obtenidos localmente. Se puede usar la cal dolomítica que tiene un equivalente de carbonato de calcio de 109 %, o dicho de otro modo, que para lograr 100 lb de carbonato de calcio se necesitan solo 93 lb de cal dolomítica. Haciendo la relación matemática:

$$\begin{array}{l} 100 \text{ lb carbonato de calcio} \quad \text{_____} \quad 93 \text{ lb cal dolomítica} \\ 4 \text{ t de carbonato de calcio} \quad \text{_____} \quad X \\ X = 4x(93/100) \\ X = \underline{3.72 \text{ t/ha}} \text{ de cal dolomítica} \end{array}$$

En el caso de usar cal viva (óxido de calcio), se necesitan 55 lb de cal viva para obtener 100 lb de carbonato de calcio.

$$\begin{array}{l} 100 \text{ lb carbonato de calcio} \quad \text{_____} \quad 55 \text{ lb cal viva} \\ 4 \text{ t de carbonato de calcio} \quad \text{_____} \quad X \\ X = 4x(55/100) \\ X = \underline{2.2 \text{ t/ha}} \text{ de cal viva} \end{array}$$

- 2) Poder Relativo de Neutralización Total (PRNT). Este es un índice que se obtiene por métodos de laboratorio y que nos indica la eficiencia de neutralización de los materiales encalantes. Para su determinación, se relaciona el poder de neutralización con la fineza del material.

En cuanto al poder de neutralización, el mejor material es aquel que en mayor proporción reacciona con el suelo en un lapso de tres meses.

Para obtener la fineza del material, este es pasado por una secuencia de tamices con diferentes aberturas (cuadro 27). El material que no pasa un tamiz de 8 mesh (mesh = aberturas/pulgada) no sirve para el encalado. El que pasa por un tamiz 20 tiene un 20 % de efectividad. Los que pasan el tamiz de 60 mesh tienen 100 % de efectividad y reaccionan en el suelo en un lapso de 3 a 6 meses. Lo ideal es aquel material que en un 70 % u 80 % pasa por el tamiz de 60 mesh.

Cuadro 27. Eficiencia relativa granulométrica de la cal de acuerdo con el tamizado.

Nº malla	Nº abertura de la malla (mm)	Eficiencia relativa (%)
< 8 mesh	> 2.36	0
8 - 20 mesh	2.36 -0.85	20
20 - 40 mesh	0.85 -0.42	40
20 - 60 mesh	0.85 -0.25	60
> 60 mesh	< 0.25	100

Método de aplicación de la cal

Cuando se usa la cal con fines de reducir la acidez y las toxicidades del suelo, en general las dosis son altas, pudiendo oscilar entre 3 y 10 t/ha; sin embargo, estas altas aplicaciones solo son necesarias una vez, ya que en lo sucesivo solo se hacen pequeñas aplicaciones para mantenimiento. Si las cantidades son altas, se recomienda fraccionarla en cantidades de entre 2 y 3 t/ha cada seis meses.

Para el efecto esperado, es necesario que la cal quede incorporada en el suelo al menos a 20 cm de profundidad, lo que se consigue con el pase del arado y la rastra. La aplicación debe hacerse antes del pase de arado y rastra, espolvoreando la cal uniformemente por todo el terreno (al voleo). Una vez aplicada e incorporada, es necesario que haya humedad en el suelo para lograr la reacción de esta con el suelo. Por eso, es más aconsejable hacer las aplicaciones en la temporada de las lluvias.

Si la tierra se va a usar para la siembra de cultivos perennes, como el de árboles frutales, la preparación del suelo debe hacerse igual, aplicando la cal uniformemente en todo el terreno y pasando el arado y la rastra después. Generalmente, con este tipo de cultivos se acostumbra a hacer agujeros de 0.5 m al cubo en el lugar de siembra, los que luego se llenan mezclando el suelo con materiales enmendantes, como la cal y gallinaza. Sin embargo, esta enmienda solo servirá por poco tiempo ya que una vez que las raíces crezcan más allá del suelo enmendado, quedarán expuestas a un suelo sin enmendar, sufriendo las plantas los daños causados por la acidez y las toxicidades. En el caso de cultivos perennes, es de suma importancia hacer una buena enmienda antes de la siembra, ya que una vez que se siembran los árboles, no habrá lugar para hacer una buena incorporación de estas. Si se puede, siempre se deben hacer los agujeros y rellenarlos con la mezcla de suelo y enmienda, como se acostumbra. En el caso de que los cultivos estén ya establecidos, la cal debe aplicarse superficialmente dentro del área de goteo o comal.

Si el suelo es suelto y no es posible la mecanización, la cal puede ser incorporada picando el suelo manualmente con azadón.

Una vez aplicada la cal, es necesario dejar un período de tiempo de al menos un mes para que reaccione, antes de sembrar o fertilizar. Es importante evitar el contacto de la cal con fertilizantes amoniacales, ya que pueden darse pérdidas de nitrógeno por volatilización. Lo mismo para los fertilizantes fosfatados, pues se producirá pérdida de solubilidad de este elemento y del calcio, debido a que forman compuestos no aprovechables por las plantas.

3.5.2 Reducción del exceso de aluminio y manganeso en suelos usando estiércoles

El encalado es eficiente en neutralizar el aluminio en el suelo, pero a corto plazo no es efectivo para neutralizar el manganeso. Para que las concentraciones de manganeso soluble (o absorbible por las plantas) se disminuyan, es necesario que el pH se incremente a 6.0. Con el encalado se logra incrementar el pH, pero lleva tiempo, hasta varios años. En el 2007, la Fundación Hondureña de Investigación Agrícola desarrolló un estudio para determinar el efecto de la aplicación de la gallinaza sobre el nivel de aluminio y manganeso de un suelo de la zona alta de Intibucá. Los análisis de suelo hechos cuatro meses después de haberse aplicado el estiércol, indicaron que la gallinaza fue efectiva para reducir el contenido de aluminio en suelo (cuadro 28) y, a pesar de que el nivel de manganeso en suelo se incrementó, debido a que la gallinaza aportó manganeso al suelo, las concentraciones de manganeso en hojas de plantas de coliflor crecidas en suelo sin gallinaza, presentaron el doble de manganeso en comparación con las hojas de plantas crecidas en suelo enmendado con 20 t/ha de gallinaza (cuadro 29). Además, solo las plantas crecidas en suelo enmendado dieron rendimientos comercializables (figura 15).

Cuadro 28. Composición química del suelo bajo diferentes dosis de enmienda orgánica, cuatro meses después de la aplicación, en La Esperanza, Intibucá, Honduras.

	Gallinaza 20 t/ha	Gallinaza 10 t/ha	Sin enmienda
Al (cmoles+)/kg)	0.40	0.60	2.05
Manganeso (ppm)	14.2	17.9	9.2
Calcio (ppm)	850	810	420
pH	5.8	5.4	5.4

* El pH en agua al 2.5:1; calcio se determinó mediante NH₄OAc 1 N a pH de 4.8; manganeso mediante DTPA pH: 7.3 y aluminio mediante KCl 1 N

**Nivel crítico del aluminio = 1 meq/100 gr.

***Nivel crítico del manganeso = 10 ppm

Fuente: Toledo 2007b.

Cuadro 29. Contenido mineral en hojas de plantas de coliflor, dos meses después del trasplante y cuatro meses después de la aplicación de gallinaza al suelo en La Esperanza, Intibucá. Honduras.

Nivel de gallinaza	Calcio (%)	Manganeso (ppm)
20 t/ha	1.63	94
10 t/ha	0.99	115
Bio-Cat (160 lt/ha)*	0.67	202
Sin enmienda	0.61	190

* "Bio-Abono CAT-15" con 15 % de ácidos húmicos, según el fabricante [Atlántica Agrícola]

Fuente: Toledo 2007.

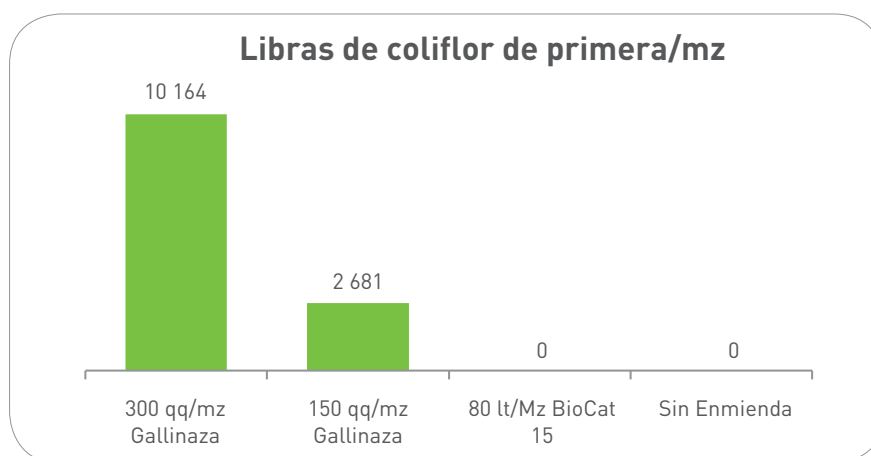


Figura 15. Rendimiento de plantas de coliflor bajo diferentes dosis y tipo de enmienda orgánica al suelo, en La Esperanza, Intibucá, Honduras.

* mz (manzana)= 7 000 m²

Fuente: Toledo 2007b.

Similares resultados se obtuvieron en el 2011 con plantas de papa de la variedad holandesa Provento, en un suelo ácido (pH 5.0) y alto en manganeso (39 ppm, acetato de amonio). En este caso, las plantas crecidas en suelo enmendado con 20 t/ha de gallinaza produjeron 30 % mayor rendimiento total y 33 % mayor producción de tubérculos de primera calidad (Toledo, 2011). También, en la medida en que se incrementó la dosis de gallinaza, se disminuyó la concentración de manganeso en hojas (figura 16).

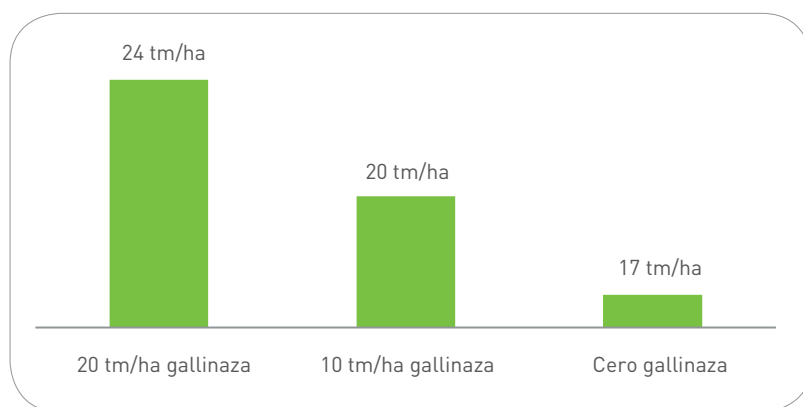


Figura 16. Efecto de dos niveles de gallinaza al suelo sobre el rendimiento de papa de primera en plantas cultivadas en un suelo ácido y con exceso de manganeso de Santa Catarina, Intibucá, Honduras.

Fuente: Toledo 2001.

Estos resultados coinciden con otros obtenidos en el trópico de Asia y África. El efecto positivo de los estiércoles aplicados a suelos con este tipo de desequilibrio se explica de varias formas: uno es que los ácidos húmicos y fúlvicos liberados durante la descomposición de los estiércoles forman compuestos no absorbibles por las plantas con el aluminio de la solución del suelo (Suthipradit, 1990; Harper, 1995). Además, los estiércoles incrementan rápidamente el pH del suelo, aunque luego baja (Naramabuye y Haynes, 2007), haciendo que el aluminio se precipite y que el manganeso se convierta a formas no absorbibles por las plantas (Whalem *et al.*, 2000; Mokolobate y Haynes, 2002). Cuando el suelo es ácido, se considera que el manganeso reduce su solubilidad 100 veces por cada unidad de pH incrementado (Hue *et al.*, 2001). A pH cercanos a seis, el aluminio forma compuestos con otros elementos, volviéndose insoluble para las plantas.

Los estiércoles, en especial la gallinaza y subproductos de la elaboración del azúcar de caña, son mejores para subir el pH, ya que presentan altos contenidos de carbonato de calcio (CaCO_3) (Mokolobate y Haynes, 2001). También, este incremento del pH podría estar relacionado con el hecho de que los ácidos húmicos y fúlvicos (que son de carga negativa) formen compuestos con el hidrógeno acidificante (el hidrógeno es de carga positiva) reduciendo la concentración de estos en solución del suelo (Mokolobate y Haynes, 2001). Además, la acidez del suelo puede disminuir como consecuencia de la aplicación de estiércoles, debido a los procesos de descarboxilación de los ácidos orgánicos (las largas cadenas de carbono se acortan) que se llevan a cabo en el proceso de descomposición del estiércol, reacción esta que consume un hidrógeno por cada grupo carboxílico descarboxilado (Yan *et al.*, 1995; Naramabuye y Haynes, 2006). Por otro lado, es posible que el calcio le confiera resistencia a las plantas al daño por toxicidad de manganeso. Hue *et al.* (2001) han encontrado una relación muy cercana entre la relación calcio/manganeso y los rendimientos de las plantas de soya.

También hay que mencionar los resultados encontrados por Hue *et al.* (2001) en Hawai, los cuales indican que el manganeso se controló mejor con sulfato de calcio (yeso), y que sustancias liberadas de la descomposición de material orgánico verde en el suelo tienden a volver más soluble el manganeso del suelo. Debido a esto, no es recomendable aplicar material orgánico verde en suelos con altos contenidos de manganeso, como los de la zona alta de Intibucá, a menos que nuevos estudios indiquen lo contrario.

Otros factores que afectan la disponibilidad del manganeso: *i)* En suelos aireados, no encharcados ni compactos, el manganeso se transforma a formas no absorbibles por las plantas. Por eso, en suelos planos, con deficiente drenaje y con altos contenidos de manganeso, la siembra en camas o eras altas resultará en menor absorción de Mn^{+2} por las plantas. *ii)* La absorción de manganeso por las plantas también se verá disminuida si el suelo tiene adecuados contenidos de otros cationes, como calcio, magnesio, cobre y hierro ya que, al ser todos cationes, compiten por espacios en la rizósfera (parte del suelo ocupada por las raíces de las plantas).

Dosis de gallinaza

Cuando se quiere revertir este estado de infertilidad, las dosis de gallinaza deben ser altas, aunque únicamente la primera vez, ya que en lo sucesivo solo se deberán aplicar pequeñas dosis de mantenimiento.

Dosis correctiva: 20 t/ha (300 qq/mz)

Dosis de mantenimiento: 3.3 t/ha/año (50 qq/mz)

Debido a la falta de tradición hortícola de los agricultores de las zonas altas de Honduras, a muchos les es difícil creer que se debe aplicar esta cantidad inicial de gallinaza, considerándola excesiva. Sin embargo, en otros países con problemas de suelo similares al nuestro, como Colombia, Brasil, trópico de África y Asia, se recomiendan dosis iniciales de entre 300 y 900 qq/mz. En la zona alta de Intibucá, cuando los suelos ácidos y con exceso de aluminio y manganeso han sido enmendados con esta dosis correctiva de gallinaza se han incrementado significativamente los rendimientos, el 200 % en coliflor y más del 30% en papa. Además, hay un significativo ahorro de fertilizantes, ya que al neutralizarse el exceso de aluminio y manganeso del suelo, hay mayor disponibilidad de fósforo para las plantas, nutriente que es muy escaso en estos suelos, debido a que es retenido formando compuestos con el aluminio y manganeso.

Forma de aplicación

1. Una vez que el terreno ha sido desmalezado, la gallinaza debe ser aplicada al voleo y de forma uniforme por toda la parcela.

En pequeñas parcelas se acostumbra a picar el suelo con azadón, antes de aplicar la gallinaza.

Si hay viento fuerte, hay que agacharse durante la aplicación para evitar que la gallinaza sea llevada por el viento.



2. Inmediatamente después de aplicada, la gallinaza debe ser incorporada hasta unos 30 cm de profundidad, ya sea mediante el pase de arado y rastra, o manualmente picando el suelo con azadón. Esto es necesario, ya que se requiere que la gallinaza quede distribuida en esta primera capa de suelo, que es donde se ubica la mayoría de las raíces de los cultivos hortícolas.



3. Una vez que la gallinaza ha sido aplicada e incorporada, el suelo debe mantenerse permanentemente húmedo y no debe cultivarse hasta dos meses después de la aplicación, esto para dar lugar a que la gallinaza haga efecto. Si la aplicación se hace en la temporada seca, el suelo enmendado debe regarse al menos una vez por semana. Lo recomendable es hacer las aplicaciones en la temporada de lluvias.

Nunca se debe dejar la gallinaza en la superficie del suelo

Esto por muchas razones: i) se puede causar daño a los cultivos debido al efecto salino que podría provocar el amontonamiento de toda esta gallinaza en la superficie del suelo, ii) toxicidad por liberación de amoníaco, iii) en suelos con pendiente pronunciada habrá pérdida de la gallinaza por el arrastre o lavado causado por el agua de lluvia o el riego por aspersores, iv) no se lograrán las reacciones químicas necesarias para que se produzca la mejoría de la fertilidad del suelo hasta la profundidad necesaria, v) multiplicación acelerada de moscas.

Los olores de la gallinaza atraen a las moscas. Si esto no se evita, las moscas pondrán sus huevos en la gallinaza y, debido a la mayor temperatura de la gallinaza en descomposición, su ciclo se acortará, dando lugar a su multiplicación acelerada.

Manejo de la gallinaza para evitar la reproducción de moscas

1. No almacenar gallinaza; debe comprarse lo necesario para aplicarla inmediatamente. Esto implica que antes de adquirirla y transportarla se debe tener el campo y los trabajadores listos para aplicarla. Si la gallinaza está cruda (húmeda, sin descomponer), se debe ubicar en un lugar alejado de las zonas habitadas, cubriendo los bultos con plástico para evitar los olores y la oviposición de la mosca. Las altas temperaturas que se generan durante la descomposición (55 a 70 °C) destruirán los organismos dañinos al humano, incluyendo huevos y larvas de moscas.
2. Una vez aplicada la gallinaza al suelo, debe incorporarse inmediatamente con el pase del arado y rastra, o picando el suelo con azadón hasta una profundidad de 30 cm.

La gallinaza es un insumo fundamental para mejorar la condición de fertilidad de los suelos de las zonas altas de Honduras, además de permitir un ahorro sustancial de divisas, ya que su uso generalizado reducirá el uso de fertilizantes sintéticos que el país tiene que comprar en el extranjero. Sin embargo, es deber de las personas que la usan, manejarla con todo el cuidado necesario para evitar que esta se vuelva foco de desarrollo de enfermedades que dañan a los cultivos y a los humanos.

3.6 Uso de los fertilizantes en suelos ácidos

Como los suelos del trópico húmedo constantemente están haciéndose ácidos, es necesario mantener un plan permanente de corrección de la acidez de los suelos agrícolas. Esto puede incluir el uso de fertilizantes que no acidifiquen el suelo, como el cloruro de potasio (KCl) y el sulfato de potasio, que son neutrales, y los que contienen nitratos, los cuales más bien tienden a reducir la acidez del suelo. Sin embargo, cuando los suelos son continuamente enmendados con cal o gallinaza, los fertilizantes acidificantes, que son los que tienen amonio o los que ya en el suelo se transforman a amonio, como la urea, pueden aplicarse, ya que el grado de acidez que forman es neutralizado por la enmienda que continuamente se aplica. Si este es el caso, en el cuadro 30 se presentan las cantidades de cal que deberíamos aplicar para neutralizar la acidez de estos fertilizantes.

Cuadro 30. Efecto de algunos fertilizantes sobre el pH del suelo.

Fertilizantes	Cantidad de cal (CaCO ₃) en lb para neutralizar la acidez de un qq del fertilizante aplicado
Acidificantes	
Sulfato de amonio	110
Fosfato diamónico (18-46-0)	70
Nitrato de amonio	60
Fosfato monoamónico (11-52-0)	59
Neutrales	
Cloruro de potasio	0
Sulfato de potasio	0
Sulfato de calcio (yeso)	0
Alcalinizantes	
	Cantidad equivalente en cal (CaCO ₃) por qq del fertilizante aplicado
Nitrato de calcio***	20
Nitrato de potasio	23
Nitrato de sodio	29

*** La absorción de los nitratos por las plantas reduce la concentración del hidrógeno acidificante del suelo debido a que este nutriente usa al menos dos átomos de hidrógeno (el hidrógeno le sirve de transportador) por cada molécula de nitrato absorbido (Mistrik y Ullrich, 1996.)

Fuente: Lorenz y Maynard 1980.

4. LA MATERIA ORGÁNICA

4.1 Concepto

La materia orgánica es todo residuo vegetal (tallos, hojas, raíces, etc.) o animal, en diferentes grados de descomposición que cubren la superficie y los primeros horizontes del suelo. La materia orgánica está en constante degradación y los residuos son descompuestos hasta los elementos primarios, los nutrientes. Las plantas y los animales se forman mediante todos los nutrientes que las plantas absorben y que los animales comen. Los cuerpos de las plantas y los animales son la suma de todos esos nutrientes. Cuando estos organismos mueren, sus cuerpos son degradados hasta llegar a obtenerse los mismos nutrientes que antes estos habían absorbido o comido. Estos nutrientes son devueltos al aire y al suelo y si el hombre no sacara cosechas de las plantas para alimentarse, al suelo regresaría, más o menos, la misma cantidad de nutrientes absorbidos por estas plantas. A esto se le llama reciclaje y es la forma como los bosques logran desarrollarse y mantenerse.

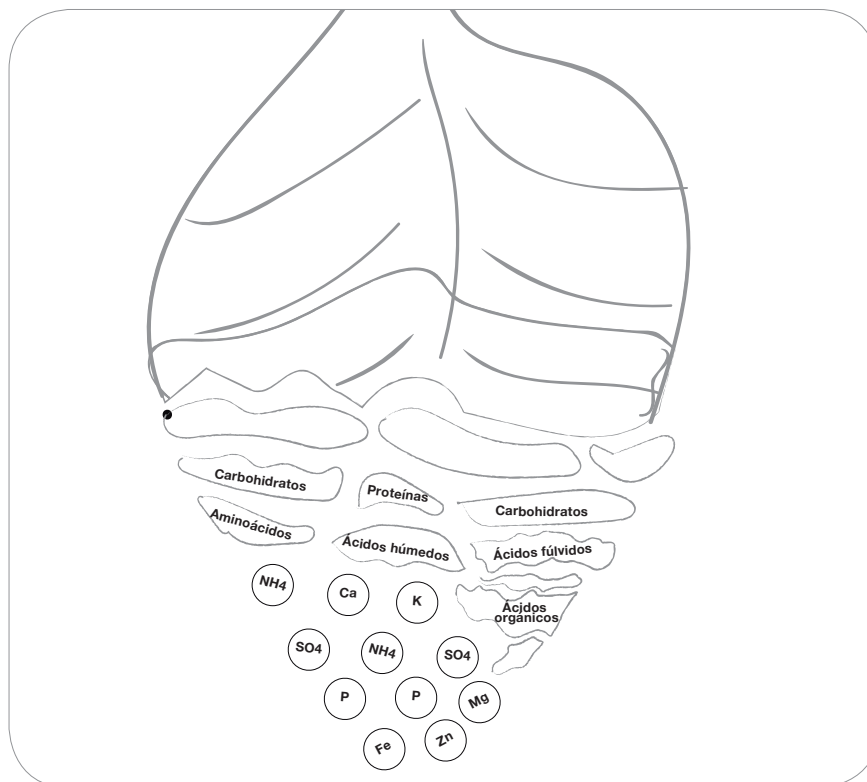


Figura 17. En el proceso de mineralización de la materia orgánica, los residuos de cultivos son degradados hasta sus elementos primarios, los nutrientes.

Pero, además de ser una fuente de nutrientes para las plantas, la materia orgánica logra que los suelos obtengan una serie de propiedades muy deseables para la agricultura, volviéndolos sueltos, con mayor capacidad de retención de la humedad, elevando la concentración de nutrientes y manteniendo la química del suelo mejor equilibrada, ya que incrementa los coloides de carga negativa (mayor capacidad de intercambio catiónico) y los de carga positiva (mayor capacidad de intercambio aniónico), lo que redundaría en una mayor capacidad de almacenamiento de nutrientes catiónicos (amonio, calcio, magnesio, potasio, hierro, zinc, cobre, manganeso) y aniónicos (fosfato, sulfato, borato, molibdato). Además, cuando se aplica materia orgánica en forma de estiércoles, se incrementa el pH, reduciéndose el efecto tóxico por excesos de elementos como el aluminio y el manganeso, y es posible que hasta se inhiba el crecimiento de algunos de los hongos del suelo que dañan las plantas, como *Rhizoctonia* y *Phytophthora*, entre otros (Arroyo, 2009).

Para obtener todos estos beneficios, es necesario que los suelos tengan cierto contenido mínimo de materia orgánica; generalmente se recomienda concentraciones no menores al 4 % (Sánchez, 1985). Pero como los humanos continuamente estamos sacando parte de las plantas para alimentarnos, en suelos usados para cultivo el contenido de materia orgánica se va disminuyendo con cada cosecha. Esta pérdida constante se agudiza si sumamos la que se pierde año a año por arrastre mediante las aguas de lluvia y se agudiza aún más cuando el material vegetal sobrante de los cultivos o montes crecidos se queman. Por eso, es fundamental que en estos suelos, la materia orgánica sea aplicada constantemente en cantidades suficientes, ya que solo de esta forma lograremos mantener su fertilidad por siempre.

La materia orgánica es descompuesta por los organismos que viven en el suelo. En realidad, la materia orgánica les sirve de alimento y en este proceso de alimentación degradan la materia orgánica hasta sus componentes primarios, los cuales pueden pasar directamente al agua del suelo para ser utilizados de nuevo por las plantas, o pueden quedar "fijados" temporalmente formando parte de sus cuerpos para luego, cuando mueren, pasar al suelo. En general, los microorganismos son especialmente importantes para llevar a cabo los últimos estados de degradación de la materia orgánica, que es cuando se liberan los nutrientes. También es importante la colaboración en la degradación de la materia orgánica de formas de vida más grandes, como los insectos, las lombrices y los nematodos, ya que estos inician el proceso de degradación, cuando la materia orgánica está recién caída al suelo.

Entonces, para obtener suelos de gran calidad para la agricultura, además de aplicar periódicamente cantidades óptimas de materia orgánica, es necesario mantener ciertas condiciones en el suelo que logren incentivar la vida y el crecimiento de los organismos vivos del suelo. Esto se consigue de varias formas: 1) manteniendo el pH del suelo a niveles entre 6.0 y 7.0, 2) evitando el encharcamiento y compactación de los suelos, 3) evitando aplicar pesticidas al suelo y cuando se hace, usar aquellos que sean lo más específicos posible, esto es, si se quiere controlar un insecto, aplicar un insecticida y no un insecticida-nematicida, 4) No hacer

quemadas, y cuando se hagan, hay que abultar el material orgánico en un determinado sitio, fuera del campo de cultivo.

Cuando se aplican materiales orgánicos a los suelos en cantidades altas, es necesario considerar que parte de los nutrientes del material serán usados por los microorganismos degradadores para alimentarse y si estos no son suficientes, ellos tomarán nutrientes del suelo. Esto es especialmente importante con el nitrógeno, ya que la experiencia indica que este elemento tiende a volverse deficiente en el suelo después de la aplicación de altas cantidades de ciertos tipos de material orgánico. La solución a esto es agregar un poco más de nitrógeno a los planes de fertilización de los cultivos en los primeros dos meses después de la aplicación de la materia orgánica para reponer el usado por los microbios. Cuando estos mueren, el nitrógeno usado, regresa al suelo.

La cantidad del nitrógeno usado por los microorganismos dependerá del tipo de material orgánico. Esto se determina de acuerdo con su grado de dureza, lo cual es dado por la relación carbono/nitrógeno (C/N) contenido en el material. En general, a mayor relación carbono/nitrógeno, más duro es el material, más necesidad de nitrógeno para los microorganismos. Se considera que en materiales con relación C/N menor de 20, los microbios no necesitan tomar nitrógeno del suelo. En el caso de los materiales presentados en el cuadro 31, los tallos y hojas de leguminosas no requerirán aplicaciones extra de nitrógeno al suelo mediante la fertilización, mientras que el aserrín requerirá mucho más nitrógeno adicional al suelo.

Cuadro 31. Relación C/N de algunos materiales.

Material	Relación C/N
Aserrín	250/1
Tallos de maíz	90/1
Zacates	75/1
Turba de bosque	30/1
Tallos y hojas de leguminosas	20/1
Humus	12/1
Microorganismos al morir	6/1

Fuente: Lorenz y Maynard 1980.

De acuerdo con Lorenz y Maynard (1980), se deben aplicar 9 kg de nitrógeno adicional al plan de fertilización por cada tonelada de materia orgánica, en peso seco, aplicada al suelo. En general, los materiales orgánicos verdes y estiércoles frescos (húmedos) tienen un contenido de materia seca de 15 %, mientras que los estiércoles secos presentan un 85 % de materia seca. Y el caso de plantas o partes de plantas secas (tallos de maíz, zacate o leguminosas) se considera que tienen un 90 % de materia seca.

Por ejemplo, se aplicó a un campo 20 t/ha de material verde (raíces, tallos y hojas de plantas verdes, que aún no están secas). Determinar cuánto nitrógeno se debe adicionar al plan de fertilización para compensar el nitrógeno usado por los microorganismos.

1. Transformamos el peso en verde a peso seco: $20 \text{ t} \times 0.15 = 3 \text{ t}$ de materia seca

Ahora, obtenemos la cantidad de nitrógeno adicional:

2. Multiplicamos el peso seco por 9 kg de nitrógeno: $3 \text{ t} \times 9 \text{ kg} = \underline{27 \text{ kg}}$ de nitrógeno

En este caso se deberá adicionar 27 kg/ha más de nitrógeno al plan de fertilización del cultivo.

Otro ejemplo:

Se aplicó a un campo 7 t/ha de tallos y hojas de maíz seco. Como el contenido de humedad en este tipo de material es de solo 10 %, consideraremos el 90 % del peso total del material aplicado como peso seco:

1. Transformamos el peso actual a peso seco: $7 \text{ t} \times 0.90 = 6.3 \text{ t}$ de materia seca

2. Multiplicamos el peso seco por 9 kg de nitrógeno: $6.3 \text{ t} \times 9 \text{ kg} = 56.7 \text{ kg}$ de nitrógeno

En este caso, se deberá aplicar 56.7 kg/ha más de nitrógeno al plan de fertilización del cultivo.

4.2 Cantidad de materia orgánica que debe ser aplicada a los suelos

La cantidad de materia orgánica a aplicar debe partir de la necesidad del suelo, lo cual es posible conocer mediante el análisis químico del suelo. Cuando se quieren corregir desequilibrios químicos o mejorar aspectos físicos del suelo, generalmente las cantidades a aplicar son altas (entre 20 a 30 t/ha). En este sentido, poca materia orgánica aplicada no logrará mejorar la condición del suelo. Sin embargo, aplicaciones excesivas de materia orgánica causará problemas iguales de dañinos que los que queremos corregir. Por ejemplo, exceso de gallinaza, causará problemas de salinidad. Esto es especialmente cierto para zonas secas o al interior de los invernaderos.

Para las condiciones de los suelos de la zona alta de Intibucá, las cantidades de material orgánico a aplicar dependerán de dos aspectos:

4.2.1 *Para corrección del desequilibrio químico de los suelos ácidos*

Esto es, incrementar el contenido de materia orgánica, elevar el pH, reducir el efecto tóxico de elementos como el aluminio y el manganeso e incrementar la capacidad de intercambio catiónico (mayor número de cargas negativas en el suelo para almacenar nutrientes de carga positiva o cationes) y la capacidad de intercambio aniónico (mayor número de cargas positivas en el suelo para almacenar nutrientes de carga negativa o aniones, como los fosfatos, nitratos o sulfatos). En este caso, se deben aplicar entre 10t y 20 t/ha de gallinaza o cualquier otro estiércol, ya que, como se dijo antes (en el capítulo del pH), estudios desarrollados en la zona alta de Intibucá, indican que esta cantidad de gallinaza fue efectiva para corregir el suelo de la condición antes mencionada. En suelos con propiedades físicas idóneas, sueltos y profundos, aplicar 10 t/ha (150 qq/mz) y en suelos pesados y poco profundos, aplicar 20 t/ha (300 qq/mz). Es mejor que el estiércol a usar esté descompuesto. En el comercio es posible obtener gallinaza procesada, aunque a un costo que es el doble o más que el de la gallinaza húmeda (cruda).

La aplicación debe hacerse espolvoreada uniformemente en todo el suelo e incorporada inmediatamente mediante el pase del arado y la rastra o manualmente, picando el suelo con azadón, para evitar que sea lavada por la lluvia. Además, cuando se aplican cantidades altas de estiércoles, estas deben ser incorporadas hasta por lo menos 20 cm de profundidad, ya que si se dejan superficialmente pueden llegar a dañar las plantas. Una vez incorporado, es necesario que el suelo permanezca húmedo, a capacidad de campo (no encharcado), y debe esperarse al menos dos meses antes de sembrar, esto para darle tiempo al estiércol de reaccionar con el suelo.

Una vez que se corrige el desequilibrio químico del suelo, en lo sucesivo solo se deben hacer aplicaciones para reponer la materia orgánica perdida.

4.2.2. Aplicaciones para reposición de la materia orgánica que se pierde

En este caso, la cantidad de material orgánico a aplicar dependerá de la velocidad de pérdida o descomposición o mineralización de la materia orgánica del suelo, lo cual está relacionado con muchos factores, como:

- 1) La temperatura del suelo.** En condiciones de temperaturas bajas, menores a 10 °C, los procesos de descomposición y actividad de los microorganismos son lentos (Fassbender, 1994), por lo que la descomposición de la materia orgánica es reducida. A altas temperaturas, 30 °C a 40 °C, se acelera bastante la descomposición y si esta no es repuesta continuamente, los suelos se vuelven infértiles rápidamente. En general, temperaturas del suelo entre 20 °C y 30 °C son ideales para la actividad de los organismos del suelo. En la zona alta de Intibucá, a 1700 m.s.n.m. y a una profundidad de 10 cm, la temperatura del suelo bajo cultivo durante el día oscila entre 19 °C en la noche y 28 °C en las horas de mayor insolación.
- 2) En suelos excesivamente ácidos,** con un pH menor a 5.0, la descomposición podría ser lenta, debido a que la acción de los microorganismos, en especial de las bacterias, se reduce.
- 3) El arrastre por la corriente de agua de lluvia o erosión.** Las pérdidas por este aspecto son altas en suelos de ladera donde no se usan prácticas de conservación de suelos. En promedio mundial, se considera que anualmente se pierde una capa de suelo de 3.933 mm por año en suelos de ladera cultivados (PNAS, 2007), esto es una pérdida muy alta, si consideramos que la formación de suelo promedio es de 0.036 mm por año (PNAS, 2007).
- 4) La humedad del suelo.** Tanto las reacciones químicas de descomposición como la actividad de los microorganismos necesitan humedad a capacidad de campo (no encharcamientos). En suelos secos se disminuyen los procesos de descomposición.
- 5) La quema.** El primer efecto directo de esta práctica es que se pierde la materia orgánica que se quema. Durante el proceso de quema, las temperaturas del suelo llegan a ser tan altas que destruyen gran parte de los organismos descomponedores de la materia orgánica (Fassbender, 1994). Además, a temperaturas arriba de 80 °C el manganeso contenido en la materia orgánica del suelo es liberado al agua del suelo (Fassbender, 1994), agudizando el problema de toxicidad en suelos con excesos de este metal, como la mayoría de suelos de la zona alta de Intibucá.

6) La intensidad de trabajo. Suelos que continuamente son cultivados, sin períodos de descanso, pierden mucha materia orgánica, ya que permanentemente tienen condiciones adecuadas para la descomposición o mineralización de la materia orgánica (buena aireación y humedad). Estos suelos necesitan reposición continua de la materia orgánica para mantener niveles óptimos de fertilidad.

Debido a esta diversidad de factores que afectan la velocidad de pérdida o descomposición de la materia orgánica del suelo y dada la multiplicidad de microclimas en las zonas tropicales, es difícil generalizar una dosis de material orgánico a aplicar a los suelos como reposición de las pérdidas. Los técnicos y agricultores deben tomar la decisión considerando todos los factores locales que afectan la descomposición. Sin embargo, algunas ecuaciones que toman en cuenta algunos de estos factores están disponibles y pueden servir como punto de partida.

A continuación se ejemplifica usando la ecuación de Henin y Dupuis (1945):

$$\frac{M = H \times K_2}{K_1}$$

Donde:

M= Cantidad de materia orgánica por año necesaria para mantener el valor de carbono/nitrógeno en suelo estable.

K₁= Factor de conversión del humus:

Material	Valor K ₁
Paja de cereales (por ejemplo, maíz)	0.2
Residuos de pastizales	0.3
Abonos verdes	0.3
Estiércol de animales	0.4 a 0.5, según su estado de descomposición
Turba de bosque	1

H= Contenido actual de materia orgánica del suelo (por análisis de suelo).

K₂= Factor de destrucción del humus:

En regiones de clima fríos (> 1000 msnm)	Valor de K ₂ *
Suelo franco arcilloso o franco limoso	0.02
Arenoso	0.025
Regiones de clima caliente (< 1000 msnm)	0.10

*Sumar 0.001, si el suelo es explotado sin descanso
Sumar 0.001, si el suelo es erosionable (en ladera con pendiente mayor al 5 %)

Ejemplo:

El análisis químico de un suelo de la zona alta de Intibucá indica un contenido de 2 % de materia orgánica. El suelo es arcilloso, continuamente trabajado para producción de hortalizas y con una pendiente de 20 %. ¿Qué cantidad de material orgánico debemos aplicar anualmente para reponer la pérdida de materia orgánica? Como material orgánico se usará gallinaza.

$$\% \text{ de material orgánico a aplicar por año} = \frac{H \times K_2}{K_1}$$

Como el suelo es arcilloso y en zona de clima frío, usaremos $K_2 = 0.02$; pero le sumaremos 0.01 debido a que es erosionable y otro 0.01 porque no tiene descanso, al final $K_2 = 0.04$. Como la enmienda a usar será gallinaza $K_1 = 0.5$ y, de acuerdo con el análisis de suelo, $H = 2\%$

$$\text{Materia orgánica a aplicar} = \frac{2\% \times 0.04}{0.5}$$

$$\text{Materia orgánica a aplicar} = \underline{0.16\% \text{ de gallinaza/año}}$$

Este 0.16 % lo pasamos a kg/ha haciendo una relación con base en la capa arable. El peso de la capa arable dependerá de la profundidad a la que se quiera trabajar y de la densidad aparente. Para fines nuestros, la profundidad será de 15 cm y la densidad aparente de 1.3 gr/cm³, que es igual a decir 1300 kg/m³. De acuerdo con esto, la capa arable se obtiene:

- Volumen de 1 ha a 15 cm de profundidad: $10\,000 \text{ m}^2 \times 0.15 \text{ m} = 1500 \text{ m}^3$
- Peso de la capa arable = volumen * densidad aparente
 $= 1500 \text{ m}^3 \times 1300 \text{ kg/m}^3 = \underline{1\,950\,000 \text{ kg}}$

Ahora, determinamos a cuántos kg/ha equivale el 0.16 % de gallinaza que debemos aplicar mediante una regla de tres:

$$\begin{array}{l} 100 \text{ kg de suelo} \quad \text{_____} \quad 0.16 \text{ kg de gallinaza} \\ 2\,000\,000 \text{ kg suelo} \quad \text{_____} \quad X \\ X = 2\,000\,000 * (0.16/100) \\ X = \underline{3200 \text{ kg/ha de gallinaza/año}} \text{ (49 qq/mz)} \end{array}$$

Recomendación: Aplicar 49 qq/mz/año de gallinaza seca. La aplicación debe hacerse espolvoreada uniformemente en todo el suelo e incorporarla inmediatamente, para que la lluvia no la lave, mediante el arado y la rastra o manualmente, picando el suelo con azadón. Una vez incorporada, es necesario que el suelo permanezca húmedo, a capacidad de campo, para que reaccione con el suelo.

4.3 Procesamiento y manejo de la gallinaza

Como ya se ha indicado, la gallinaza y los demás estiércoles, son un valioso aliado para devolverle la fertilidad a los suelos de las zonas altas de Honduras.

La gallinaza es el desecho de las granjas avícolas, compuesta mayormente de orina y heces de las gallinas junto con el material que conforma la cama, lecho o piso y que, generalmente, es aserrín o casulla de arroz. Este material, cuando recién salido de la granja, está en una condición denominada “cruda”, que significa que sus componentes químicos aún no han sido degradados. Esta degradación es llevada a cabo por microorganismos descomponedores de la materia orgánica que habitan el aire y el suelo. Si se aplican altas cantidades de esta gallinaza “cruda” al suelo, los microorganismos comenzarán inmediatamente su degradación. Esta degradación afectará negativamente a las plantas, ya que el proceso de descomposición incrementará excesivamente la temperatura del suelo inmediato a las raíces y liberará amoníaco en concentraciones tóxicas para las plantas, por un lado, y por otro, los microorganismos descomponedores usarán nutrientes del suelo para complementar su alimentación, lo que causará deficiencias nutricionales en los cultivos. Además, los cultivos y las personas podrían ser seriamente afectados por enfermedades causadas por microbios que a veces se encuentran en la gallinaza cruda. Para evitar esto, es necesario someter la gallinaza a un proceso de descomposición que permitirá obtener un producto final químicamente más estable, libre de agentes patógenos y sin malos olores y que por tanto, pueda ser usada para fines agrícolas.

En el mercado de las zonas hortícolas de Honduras se vende gallinaza procesada y lista para ser aplicada. También, se puede adquirir gallinaza “cruda” en las granjas avícolas de todo el país, a un costo mucho menor. Sin embargo y como ya se dijo, en este caso la gallinaza debe ser procesada, antes de ser aplicada a los suelos.

Proceso de descomposición de la gallinaza

Aunque la descomposición de la gallinaza puede lograrse en condiciones anaeróbicas (sin oxígeno), nosotros mencionaremos la descomposición aeróbica (con oxígeno) ya que es más eficiente, fácil y barata. A esta forma de descomposición se le denomina **compostaje** y consiste en amontonar la gallinaza en un lugar seguro para las personas y darle el manejo adecuado para que los microorganismos degradadores aceleren la descomposición. Para que el proceso se desarrolle rápidamente, es necesario que las pilas o bultos de gallinaza permanezcan aireados y con humedad. También ayudará a acelerar el proceso, mezclar la gallinaza con aserrín de madera, ya que de esta forma se incrementará la relación carbono/nitrógeno, lo que ayudará a mejorar el desempeño de los microbios (James, 1992). Esto se hace debido a que la gallinaza presenta una relación carbono/nitrógeno baja (6 a 10), recomendándose para estos fines, relaciones entre 20 y 30.

Compostaje

1. Hacer pilas o bultos de gallinaza en un lugar sombreado (que no reciba la luz directa del sol) y de tamaños que permitan el manejo. Por ejemplo, hay que considerar que los bultos deben ser removidos o volteados continuamente y si esta labor se hace manualmente, los bultos deben ser más pequeños (2 m de altura) que si se hace con maquinaria. Si la remoción se hace con un motocultor, lo mejor es hacer bultos de poca altura (1 m) pero largos. También, el tamaño de los bultos dependerá del tamaño del lugar y la cantidad de material a compostar.

En la medida en que se forman los bultos, deben deshacerse los “terrones”, ya que son material compactado que no permite el ingreso del aire.

2. Si el material se encuentra seco, debe humedecerse. Esta labor debe hacerse conforme se hacen las pilas o montones. Se debe evitar la saturación de agua, pues esto ocasionará que se llenen los espacios, dejando el interior del bulto sin lugar para el aire. Si el interior del bulto no se airea, se producirá pudrición, lo que causará malos olores y atraerá a las moscas. Se recomienda un nivel de humedad del 60%. Una forma práctica de determinar el nivel adecuado de humedad es apretando con el puño una porción de gallinaza húmeda y si esta se deshace al abrir el puño, significa que está bien, pero si se mantiene compactada, significa que la humedad aplicada es excesiva.
3. Cubrir el bulto con plástico. Si el compostaje se lleva a cabo en un lugar cercano a zonas habitadas (menos de cinco km de distancia), los bultos de gallinaza deben cubrirse con plástico. Esto para evitar la reproducción acelerada de moscas y los malos olores. Además, el plástico evitará que la gallinaza se moje por la lluvia, si esta es compostada en lugares sin techar.
4. Una vez que el bulto o pila de gallinaza ha sido formado y humedecido, se deberá voltear continuamente para facilitar la entrada del aire a las zonas internas del bulto, permitiendo que llegue suficiente oxígeno hasta los microorganismos descomponedores. El volteo puede hacerse diariamente o día de por medio o una o dos veces por semana, dependiendo de la situación. Si los bultos son muy grandes, lo mejor es voltearlos diariamente, ya que las partes más internas rápidamente se quedarán sin oxígeno. Si los bultos son pequeños (1.5 a 2 m de altura), los volteos pueden distanciarse más. Si el material es muy fino (polvoso), también requerirá un volteo más continuo. Una forma de distanciar los volteos es mezclando la gallinaza, en el momento de hacer los bultos, con materiales que faciliten la aireación, como trozos de cañas secas de maíz, casulla de arroz, hojas secas, colochos de madera.

Si los bultos de gallinaza son cubiertos con plástico, lo mejor es voltearlos diariamente o, máximo, día de por medio, quitándolo al momento del volteo y poniéndolo nuevamente cuando la labor haya concluido.

5. Monitorear la temperatura, ya que esta es el indicativo de si el proceso se está llevando adecuadamente. Normalmente, la temperatura se incrementa rápidamente en los primeros días hasta niveles por arriba de los 60 °C, manteniéndose así en las primeras tres semanas, tiempo después del cual desciende paulatinamente hasta estabilizarse en 30 °C o 35 °C. Si la temperatura no sube hasta los niveles antes mencionados significa que el proceso no se está desarrollando bien y habrá que reiniciarlo.

Si el compostaje se desarrolla debidamente, la gallinaza deberá estar lista para usarse a los 45 días después de iniciado. No es el fin del proceso, ya que una vez que la temperatura baja, la gallinaza entra en un estado de “maduración”, donde se llevan a cabo más reacciones químicas que terminan de estabilizarla. Este proceso se da a temperatura ambiente y puede durar algunos meses (Estrada, 2005).

Una forma de desinfección más rápida

Con la finalidad de evitar que agentes patógenos se propaguen a través de la comercialización de la gallinaza, en Colombia se recomienda un método más rápido de desinfección (alrededor de ocho días). Este consiste en elevar la temperatura del bulto a niveles por arriba de 55 °C en el menor tiempo y mantenerlo así, por lo menos cinco días. Al final se tiene un producto desinfectado, aunque no lo suficientemente descompuesto. En Colombia, este método es recomendado para los productores avícolas, ya que tienen prohibido transportar gallinaza fuera de la granja, si esta aún no ha sido desinfectada (Periódico Vallevirtual, 2008). En realidad es el mismo proceso de compostaje, interrumpido una vez que el material ha estado a temperaturas de 55 °C o más por, mínimo, cinco días. A continuación se describen los pasos a seguir, descritos por el colombiano Dr. Preciado Restrepo (2006):

1. Desocupar el galpón, cuya cama será cambiada. Esto con el fin de dejar espacio para llevar a cabo el proceso de desinfección de la gallinaza en el mismo galpón.
2. Recolectar y quemar las plumas de gallinas regadas en el piso, esto para permitir una mayor permeabilidad de la cama.
3. Humedecer la cama, pero evitando el encharcamiento. Esto permitirá que los microbios descomponedores se multipliquen.
4. Abultar o apilar la gallinaza, picando las partes compactas. Se recomienda hacer bultos de mínimo 1.8 m de alto y 2.5 a 3 m en la base.

5. Cubrir los bultos de gallinaza con plástico, esto con el objetivo de retener el calor, por lo que cuanto más grueso, mejor. En este caso, no hay volteos y el plástico se mantiene permanentemente cubriendo los bultos hasta el fin del proceso.

Durante el desarrollo de estas labores los trabajadores deben usar mascarillas, ya que la cama desprenderá amoníaco y polvo, que puede causarles irritaciones.

Si el proceso está bien hecho, se pueden alcanzar temperaturas de 40 °C en las primeras 24 horas, 48 °C a las 48 horas, 56 °C a las 72 horas y 60 °C o más a los cuatro días después de iniciado el proceso. Es necesario mantener los bultos de gallinaza a una temperatura de 55 °C o más por cinco días, para considerar que los patógenos han sido destruidos. Una vez lograda la desinfección, el bulto debe voltearse para airearlo y se debe dejar así por al menos tres días, antes de empacarlo. Se debe tomar en cuenta que a este material aún le resta tiempo para descomponerse y si se aplica directamente al suelo en grandes cantidades, es posible que cause algún daño a las plantas. Lo mejor es continuar el proceso de compostaje, posteriormente.

5. LOS NUTRIENTES

5.1 Concepto

Los nutrientes son sustancias que sirven de alimento a las plantas. Actualmente se acepta que son 16 los nutrientes esenciales necesarios para el desarrollo de las plantas, tal como se presentan en el cuadro 32. Con solo un nutriente que haga falta en la cantidad necesaria o con uno que esté en niveles excesivos, las plantas no podrán desarrollarse adecuadamente.

De los 16 nutrientes, tres están en la naturaleza en cantidades suficientes para las plantas y no es necesario suplirlos mediante fertilizantes. Estos son el carbono (C), que es tomado del aire a través de las aberturas de las hojas (estomas); el hidrógeno (H⁺), que es tomado del agua del suelo y el oxígeno (O⁻²), que es tomado del suelo por las raíces, pero en forma gaseosa. Solo bajo ciertas condiciones estos pueden volverse deficientes, como por ejemplo, bajo invernaderos cubiertos totalmente con plástico o vidrio se presentan deficiencias de carbono en el aire. Esto debido a que el interior del invernadero está aislado del aire exterior, que es donde está el carbono. En estos casos, es necesario suplir carbono a las plantas, lo que se logra quemando gas de petróleo o madera en el interior de los invernaderos. El hidrógeno, que es proveído por el agua, se volverá deficiente cuando no hay humedad en el suelo (aunque en este caso, las plantas sufrirían antes por deshidratación) y el oxígeno se escaseará, si hay encharcamiento o compactación en el suelo.

Cuadro 32. Nutrientes esenciales para las plantas, su símbolo y carga eléctrica.

Nutrientes catiónicos	Símbolo y carga eléctrica	Nutrientes aniónicos	Símbolo y carga eléctrica
Carbono	CO ₂	Oxígeno	O ⁼
Calcio	Ca ⁺⁺	Nitrato	NO ₃ ⁻
Magnesio	Mg ⁺⁺	Sulfato	SO ₄ ⁻
Potasio	K ⁺	Ácido fosfórico	H ₂ PO ₄ ⁻ y HPO ₄ ⁼
Sodio	Na ⁺	Molibdato	MoO ₄ ⁼
Hierro	Fe ⁺⁺ y Fe ⁺⁺⁺		
Manganeso	Mn ⁺⁺		
Amonio	NH ₄ ⁺		
Hidrógeno	H ⁺		
Cobre	Cu ⁺⁺		

5.2 Absorción de nutrientes por las plantas desde el suelo

Hay varias formas en que los nutrientes penetran desde el agua del suelo al interior de las plantas (cuadro 33). Uno de ellos es a través del agua absorbida. En este caso, los nutrientes son arrastrados al interior de las plantas por el flujo de agua transpirada por las plantas, pasando por la raíz, el tallo, hasta ser depositados en las hojas, donde son usados para fabricar compuestos necesarios para las plantas. A esta forma de absorción se le denomina “flujo masal” y se considera que casi la totalidad del nitrógeno, azufre, molibdeno, 70 % del calcio y un 20 % de potasio, penetran a las plantas de esta forma. Si la disponibilidad de agua en el suelo es deficiente, también será deficiente la absorción de estos nutrientes, aun cuando las plantas hayan sido fertilizadas.

Otros nutrientes penetran dentro de las plantas siempre que estos se encuentren en contacto con las raíces. A esta forma de absorción se le denomina “por intercepción” y es especialmente importante para la entrada a las plantas del calcio, que es un elemento poco móvil en el suelo. Se considera que al menos un 30 % del calcio entra a las plantas de esta forma. Por eso es conveniente incentivar el crecimiento radicular de las plantas y corregir situaciones que lo impidan, como suelos muy compactos, toxicidades y encharcamiento. En plantas de cierta especie, *Arabidopsis*, investigadores franceses han encontrado un mecanismo interno que parece detectar los espacios de la rizósfera con presencia de nitratos (como un sensor) a la vez que estimulan el alargamiento de determinadas raíces en esa dirección (Krouk *et al.*, 2010). Aunque este es un comportamiento normal de todas las plantas, las cuales presentarán mayor densidad de raíces en espacios del suelo donde hay mayor contenido de nutrientes o humedad.

El otro mecanismo importante para la toma de nutrientes por las plantas es “por difusión”. Este consiste en el movimiento de los elementos en solución (en el agua del suelo) de sitios de mayor concentración a sitios de menor concentración. Las raíces en el suelo se encuentran en contacto con el agua, rodeada de todos los nutrientes que flotan en esa misma agua. Si la cantidad de un nutriente que está en el agua del suelo es mayor que la cantidad de ese mismo nutriente dentro de las raíces, este penetrará al interior de las raíces en cantidad suficiente hasta establecer el equilibrio dentro y fuera de la raíz. Esta forma de absorción es especialmente importante para la toma del fósforo y el potasio por las plantas. La falta de humedad en el suelo limita fuertemente esta forma de absorción.

Hay nutrientes cuyo ingreso a las raíces es más sofisticada y absorberlos conlleva gasto de energía por parte de las plantas, como el nitrato, que además de necesitarse energía es necesario que se una a hidrógenos (dos o más hidrógenos/cada nitrato) para atravesar la epidermis de las raíces (Mistrik and Ullrich, 1996). Más recientemente se ha encontrado que una proteína, denominada NRT1.1, también sirve de transportador al nitrato (Krouk *et al.*, 2010). Este tipo de absorción también sucede con otros nutrientes y usando otros transportadores, como el sodio Na^+ (García Sánchez *et al.*, 2000); y se da cuando la planta tiene que absorber los nutrientes en contra de gradientes de concentración o gradientes electroquímicos (Jackson *et al.*, 2008).

Cuadro 33. Mecanismos de suministro de nutrientes a las raíces de maíz desde el suelo.

Nutriente	Flujo masal (%)	Intercepción radicular (%)	Difusión (%)
Nitrógeno	98.8	1.2	0
Fósforo	6.3	2.8	90.9
Potasio	20.0	2.3	77.7
Calcio	71.4	28.6	0
Azufre	95.0	5.0	0
Molibdeno	95.2	4.8	0

Fuente: Donahue *et al.*, 1981.

Los macronutrientes

Hay nutrientes que las plantas los usan en grandes cantidades, como el nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre. Debido a esto, se les denomina elementos mayores o macronutrientes y los suelos no los tienen en cantidades suficientes. Por lo que, para cualquier cultivo, estos nutrientes siempre habrá que suplirlos mediante fertilización, en especial el nitrógeno, fósforo y potasio. En general, la disponibilidad de estos elementos está relacionada con el pH del suelo, por ejemplo:

El calcio y magnesio se vuelven escasos en el suelo con pH muy ácidos, debajo de 5.0, y se vuelven excesivos a pH mayores de 7.0, pudiendo más bien llegar a causar daño a las plantas por salinidad.

El fósforo está más disponible para las plantas a pH entre 6.0 y 6.5; por debajo de 6.0 tienden a formar compuestos no absorbibles por las plantas con el hierro, aluminio, manganeso (Fassbender, 1994) y por arriba de 7.0 forman compuestos no absorbibles por las plantas con aluminio y calcio.

En el caso del nitrógeno, hay dos formas de este elemento que pueden ser absorbidas por las plantas, en forma de amonio (NH_4^+) y en forma de nitrato (NO_3^-) (Jackson *et al.*, 2008; Jingquan y Dewei, 1988). En hidroponía, pH entre 4.5 y 6.0 favorecen la absorción de nitrato, mientras que pH entre 6.0 y 7.0 favorecen la absorción de amonio (Hageman, 1984).

Por otro lado, la presencia de los nutrientes de carga positiva, como el amonio, calcio, magnesio y potasio en el suelo, está también relacionada con la cantidad de cargas negativas presentes en los coloides del suelo. En suelos con pocas cargas negativas (baja CIC) estos nutrientes tienden a ser lavados por el agua de lluvia y riego.

Los micronutrientes

Hay otro grupo de nutrientes que las plantas los usan en mínimas cantidades, como el hierro, manganeso, cobre, zinc, boro, molibdeno, sodio, cloro. A raíz de esto, se les llama elementos menores o microelementos. En la mayoría de veces los suelos los contienen en cantidades suficientes para las plantas, sin embargo, a veces están en cantidades insuficientes o en exceso, causando, en este último caso, problemas de toxicidad. La disponibilidad de estos micronutrientes para las plantas también está directamente relacionada con el pH.

En general, cuando el pH es ácido (abajo de 7.0), el contenido de hierro, zinc, boro, manganeso se incrementa y el del molibdeno, se reduce. Cuando el pH es muy ácido (debajo de 5.5), el hierro, manganeso, zinc y boro pueden llegar a intoxicar las plantas y el molibdeno se vuelve escaso. Cuando el pH es básico (arriba de 7.0), ocurre lo contrario, el molibdeno se vuelve más disponible para las plantas, mientras que el hierro, zinc, boro, manganeso reducen su disponibilidad. Cuando el pH es muy alto o muy alcalino, la disponibilidad del hierro, manganeso, zinc y boro se escasea al punto de volverse deficientes.

Es sumamente importante monitorear en forma continua las concentraciones de microelementos y el pH de los suelos.

5.3 Nutrientes que las plantas requieren en altas cantidades

5.3.1. Nitrógeno

El nitrógeno es componente de la clorofila y de los aminoácidos. Es un elemento móvil dentro de la planta y cuando hay carencia, este es llevado de las hojas viejas a los puntos de crecimiento. Debido a esto, los primeros síntomas de su deficiencia se observarán como amarillamientos o enrojecimientos en las hojas viejas. En el cuadro 34 se presentan los requerimientos de nitrógeno para algunos cultivos.

Cuadro 34. Absorción de nitrógeno por algunos cultivos.

Cultivo	Rendimiento (t/ha)	Absorción de nitrógeno (kg/ha)
Arroz	7.8	125
Café pergamino	3.2	500
Caña de azúcar	112.0	235
Maíz	10.0	240
Sorgo	8.4	250
Soya	4.0	350
Tomate	90.0	260
Yuca	40.0	260

Fuente: Potash & Phosphate Institute, 1994.

El 95 % del nitrógeno del suelo está almacenado en la materia orgánica y este es liberado al agua del suelo en la medida en que los microorganismos descomponen esta materia orgánica. La cantidad de nitrógeno en el suelo se puede medir de forma indirecta, partiendo del contenido de materia orgánica. En general se considera que el 5 % de la materia orgánica es nitrógeno total y que de este solo entre el 2 % y 3 % es liberado anualmente al agua del suelo para ser usado por las plantas. Relacionando estos datos se puede obtener la cantidad de nitrógeno disponible para las plantas en los suelos. Si este es bajo, se hace uso del fertilizante para incrementar los niveles.

Determinación de la necesidad de nitrógeno

Por ejemplo, se quiere determinar el contenido de nitrógeno de un suelo que tiene 2 % de materia orgánica. Asumir que el suelo es franco (igual proporción de arena, limo y arcilla) y que por tanto tiene una densidad aparente de 1.33 gr/m^3 que es lo mismo que 1330 kg/m^3 . Se considerará 20 cm de profundidad del suelo, ya que a esta profundidad se encuentra la mayoría de las raíces de las especies hortícolas.

1. Determinamos el volumen de suelo de una hectárea, la que se obtiene al multiplicar: 100 m (un lado de la hectárea) X 100 m (el otro lado de la hectárea) X 0.20 m (la profundidad del suelo) = 2000 m³

2. Determinamos el peso del volumen de suelo por hectárea:

Volumen x densidad aparente:

$$2000 \text{ m}^3 \times 1330 \text{ kg/m}^3 = 2\,660\,000 \text{ kg}$$

3. Obtenemos el peso de la materia orgánica contenido en una hectárea.

$$\begin{array}{r} 100 \text{ kg de suelo} \quad \text{_____} \quad 2 \text{ kg de materia orgánica} \\ 2\,660\,000 \text{ kg de suelo} \quad \text{_____} \quad X \\ \hline (2\,660\,000 \times 2)/100 = \underline{53\,200 \text{ kg/ha de materia orgánica}} \end{array}$$

4. Determinamos la cantidad de nitrógeno total: Como sabemos que, en promedio, el 5 % de la materia orgánica es nitrógeno, entonces:

$$\begin{array}{r} 100 \text{ kg de materia orgánica} \quad \text{_____} \quad 5 \text{ kg de nitrógeno} \\ 53\,200 \text{ kg de materia orgánica} \quad \text{_____} \quad X \\ \hline (53\,200 \times 5)/100 = \underline{2\,660 \text{ kg/ha de N total}} \end{array}$$

5. Determinamos la cantidad de nitrógeno liberado anualmente al suelo (nitrógeno mineralizable), partiendo del nitrógeno total. Se asume que en promedio un 2 % del nitrógeno total se libera al agua del suelo. Entonces:

$$\begin{array}{r} 100 \text{ kg de nitrógeno total} \quad \text{_____} \quad 2 \text{ kg de nitrógeno mineralizarle} \\ 2660 \text{ kg de nitrógeno total} \quad \text{_____} \quad X \\ \hline (2660 \times 2)/100 = 53.2 \text{ kg/ha de nitrógeno/año o} \\ \text{dicho de otro modo, este suelo libera 4.43 kg de} \\ \text{nitrógeno utilizable por las plantas cada mes.} \end{array}$$

Entonces, si un cultivo va a estar en el campo por 3 meses, podrá absorber unos 13 kg de nitrógeno del suelo. Si esto no es suficiente, habrá que adicionar el resto mediante fertilizantes sintéticos.

Suponiendo que el cultivo necesita 100 kg/ha de nitrógeno, tendríamos que complementar los 87 kg que faltan mediante el fertilizante.

Ahora debemos determinar la cantidad de fertilizante nitrogenado requerido para adicionar al suelo los 87 kg de nitrógeno que aún requiere el cultivo. En este punto debemos considerar la concentración y eficiencia del fertilizante. La concentración varía con el tipo de fertilizante y en general, la eficiencia de los fertilizantes nitrogenados aplicados al suelo es de entre un 50 % y un 60 %.

Por ejemplo, si se usa como fuente de nitrógeno el fertilizante urea (que contiene 46 % de nitrógeno), determinamos la cantidad requerida de la siguiente forma:

1. De acuerdo con la concentración de nitrógeno de la urea, ¿cuánto fertilizante se necesita para obtener los 87 kg requeridos?

$$\begin{array}{r} 100 \text{ kg de urea} \quad \text{_____} \quad 46 \text{ kg de nitrógeno} \\ X \quad \text{_____} \quad 87 \text{ kg de nitrógeno} \\ \hline (87 \times 100)/46 = 189 \text{ kg/ha de urea} \end{array}$$

2. Considerando que la eficiencia del fertilizante es del 60 % (que del total solo el 60% será aprovechado por las plantas), entonces ¿Cuánto se debe aplicar para lograr los 189 kg de urea necesarios?

$$\begin{array}{r} 100 \text{ kg de urea} \quad \text{_____} \quad 60 \text{ kg es aprovechable} \\ X \quad \text{_____} \quad 189 \text{ kg} \\ \hline (189 \times 100)/60 = 315 \text{ kg/ha de urea (4.85 qq/mz)} \end{array}$$

Disponibilidad de nitrógeno en el suelo

Sin embargo, el hecho de que el suelo tenga materia orgánica no es del todo condicionante de que ese suelo provea nitrógeno a las plantas. La liberación del nitrógeno desde la materia orgánica dependerá del contenido y actividad de los microorganismos del suelo y condiciones que permitan el buen desempeño de estos. favorecerá la liberación del nitrógeno; como una buena aireación (no permitir encharcamientos, hacer zanjas de drenaje y camas altas en suelos pesados), humedad a capacidad de campo (no permitir la resequedad del suelo), pH entre 6.0 y 7.0, mantener temperaturas del suelo idóneas; temperaturas menores a 10 °C y mayores de 35 °C reducirán el trabajo de los microorganismos, por ejemplo, cuando se usa plástico en el suelo, el plástico transparente puede incrementar las temperaturas del suelo por arriba de 40 °C en horas de mayor insolación, y cuando los rayos solares impactan directamente sobre el plástico.

De acuerdo con lo anterior, podríamos considerar que el aporte de nitrógeno por la materia orgánica en la mayoría de suelos en la zona alta de Honduras es reducido; esto debido al exceso de acidez, que podría estar limitando la actividad de los microorganismos degradadores de la materia orgánica y, en menor grado, a las bajas temperaturas. En suelos bajo esta situación no se recomienda usar el contenido de materia orgánica como criterio para determinar el contenido de nitrógeno disponible para las plantas (García y Pantoja, 1998). La corrección de esta situación mediante encalado o aplicaciones de estiércoles, aumentará significativamente la liberación de este nitrógeno.

La descomposición de la materia orgánica del suelo genera nitrógeno en forma amoniacal (NH_4^+), luego este es rápidamente cambiado por la actividad de los microorganismos a nitrato (NO_3^-); proceso denominado nitrificación. Se había dicho ya que el nitrógeno puede ser absorbido por las plantas bajo estas dos formas. En medios nutritivos (hidroponía), el nitrato es más absorbido a pH entre 4.5 y 6.0 y el amonio es más absorbido a pH entre 6.0 y 7.0 (Hageman, 1984). Este mismo autor señala que a pH entre 4.0 y 6.5, la absorción del amonio es dependiente de la temperatura y se obtiene la mayor absorción a 27 °C. La absorción del nitrato fue totalmente dependiente de la temperatura con un óptimo a 35 °C.

También se había dicho que la absorción de nitrato requiere mayor gasto de energía por parte de la planta y que además, para cruzar al interior de la raíz necesita ser transportado por hidrógeno, de tal forma que se considera que se usan al menos dos hidrógenos por cada molécula de nitrato absorbido. Debido a esto, cuando las plantas absorben nitrato hay un incremento en el pH en los sitios adyacentes a las raíces, lo cual es de mucho beneficio para las plantas creciendo en suelos ácidos. Por el contrario, cuando las plantas absorben amonio, la tendencia del pH es a bajar (hacerse más ácido), esto debido a que, en general, las raíces regresan a la solución del suelo un hidrógeno por cada catión que absorben (el amonio es un catión), como de igual forma, regresan un anión (HCO_3^- u OH^-) por cada anión que absorben (como el nitrato); esto con el objetivo de mantener el equilibrio interno de cargas (equilibrio electrostático).

Bajo condiciones de falta de oxígeno (anaeróbico), como el encharcamiento, no hay transformación de amonio (NH_4^+) a nitrato (NO_3^-) debido a que para esto es necesario el oxígeno. Bajo esta condición de encharcamiento, los microorganismos convierten el nitrato a amonio, con grandes pérdidas de nitrógeno por volatilización de compuestos intermedios entre el nitrato y el amonio (óxido nitroso) (Jackson *et al.*, 2008). Por eso, cuando se cultiva arroz por inundación (medio limitado de oxígeno) el fertilizante nitrogenado a aplicar debe ser el amoniacal y no el nitrato.

El amonio, que tiene carga positiva, puede ser almacenado en el suelo, ya que se adhiere a los coloides de carga negativa. El nitrato es más sensible a ser lavado por el agua de lluvia y de riego ya que tiene carga negativa y los coloides de carga positiva, que es donde podría sostenerse, son más escasos en la mayoría de los suelos. A raíz de esto, se considera que en el suelo el nitrato se mueve 10 veces más que el amonio (Jackson *et al.*, 2008). Entonces, cuando aplicamos fertilizantes a base de nitratos, como nitrato de calcio o nitrato de potasio, estos deben ser aplicados en pequeñas cantidades pero más frecuentemente para reducir las pérdidas por lavado, en especial en la temporada de lluvias.

Una práctica recomendada es que de todo el nitrógeno a aplicar en una fertilización, una parte sea en forma amoniacal y la otra en forma de nitrato. Así, el nitrato puede ser inmediatamente utilizado por las plantas, mientras que el amonio, retenido por los coloides, puede ser usado después.

Qué proporción de amonio/nitrato se debe usar

Ya sea que la fuente del nitrógeno que apliquemos como fertilizante sea en forma de urea, amonio o material orgánico, estos serán transformados por los microorganismos del suelo a nitrato.

Las plantas usan el nitrógeno para producir aminoácidos. A partir de los aminoácidos, se forman proteínas que son necesarias para usarse en el desarrollo de las plantas.

Cuando las temperaturas del ambiente están por arriba del óptimo para cada cultivo, la formación de aminoácidos a partir del amonio se vuelve deficiente, ya que bajo esta condición el oxígeno dentro de las plantas se escasea y las plantas incrementan la respiración (proceso químico por el cual las plantas logran obtener energía), haciendo uso de más azúcares, por lo cual estos se escasean también y no llegan a las raíces en la misma proporción con la que es absorbido el amonio. Si mucho amonio se acumula dentro de la planta, este puede causar toxicidad (Jingquan y Dewei, 1988). En Honduras, situaciones de alta temperatura del ambiente (35 °C a 40 °C) pueden darse frecuentemente en lugares situados por debajo de los 1000 metros sobre el nivel del mar, o dentro de invernaderos. En estos casos, la fertilización nitrogenada debe hacerse usando solamente nitrato. En condición de bajas temperaturas es más efectivo el metabolismo del amonio dentro de las plantas, ya que el oxígeno y los azúcares están más disponibles (hay reducida respiración), además de que el transporte de los nitratos a las hojas disminuye.

Los cambios fuertes de temperaturas son frecuentes en los altiplanos de Honduras entre los meses de noviembre a marzo, debido a los frecuentes frentes fríos que azotan durante ese período. Durante los frentes fríos, que pueden durar de unos días hasta una semana, las temperaturas descienden hasta los 8 °C o 10 °C durante el día. En estos períodos de bajas temperaturas es mejor aplicar el nitrógeno de forma amoniacal, lo cual resulta fácil cuando la fertilización de los cultivos se lleva a cabo a través del riego.

En cultivos en los que la mayoría del crecimiento es en las hojas (repollos, coliflores, brócolis, lechugas, espinacas), los azúcares son consumidos rápidamente en las hojas y son menos disponibles para ser llevados a las raíces, causando que el metabolismo del amonio sea deficiente. En este caso, es recomendable una proporción baja de amonio y mayor de nitrato, en los planes de fertilización de nitrógeno.

Bajo condiciones normales de temperatura, la aplicación de nitrógeno usando como fuente solo el amonio puede traer malas consecuencias ya que los azúcares son usados a gran velocidad, escaseándose y haciendo que las plantas “se vayan en vicio”, condición que se caracteriza por crecimientos blandos y tiernos por mucho tiempo y reducción de la floración (Navarro Blaya y Navarro García, 2003).

Las proporciones varían con las especies cultivadas, por ejemplo, un cultivo de trigo creció mejor cuando la proporción amonio/nitrato fue mitad y mitad (Sandoval, 1992). En un cultivo de papa se encontró que el amonio fue más absorbido que el nitrato al inicio del crecimiento, no hubo diferencias entre ambos tipos de nitrógeno entre los 28 y 49 días después de la siembra, y fue más absorbido el nitrato a partir de los 56 días (formación de tubérculos) (Coraspe *et al.*, 2009). En México se reporta que, en hidroponía, la cebollina produjo más cuando el nitrógeno fue dado totalmente como nitrato y que la albahaca produjo más cuando el nitrógeno se aplicó en una proporción de 20 % amonio y 80 % nitrato (González, 2009). Sin embargo, en estos casos habrá que considerar los aspectos de temperatura y pH del sustrato bajos los cuales se llevan a cabo estos estudios, pues ya sabemos que estos tienen efecto directo sobre la eficiencia de una u otra forma de nitrógeno.

Actualmente, las proporciones en que deben aplicarse estas dos formas del nitrógeno a las plantas son motivo de investigación y hasta hoy se sabe que estas proporciones dependerán de factores como los antes mencionados. No obstante, se ha generalizado que una proporción 20 % amonio y 80 % nitrato es adecuada para la mayoría de cultivos y condiciones.

Los fertilizantes nitrogenados

Urea [CO (NH₂)₂] Este fertilizante contiene 46 % de nitrógeno, es soluble en agua, no combustible y de baja toxicidad. Por su alta solubilidad, puede ser usado para fertilizaciones mediante el riego. La urea acidifica fuertemente los suelos, a tal grado que es necesario aplicar 84 lb de carbonato de calcio por cada quintal de urea aplicado al suelo para neutralizar su efecto acidificante. Cuando se aplica urea a los suelos húmedos, esta es desdoblada a los gases amoníaco (NH₃) y dióxido de carbono (CO₂), gracias a la acción de una sustancia presente en los suelos, denominada ureasa. En un lapso de un día a máximo una semana, el 60 % de la urea aplicada al suelo ha sido desdoblada (Wayne, 2001). Una vez que el amoníaco es liberado al agua del suelo, este es transformado en amonio (NH₄). Para evitar que el nitrógeno de la urea se pierda por volatilización como amoníaco, es necesario que este sea convertido rápidamente en amonio, lo cual será posible si hay presencia de hidrógeno en el medio. Por tanto, resulta más efectivo aplicar urea a suelos un tanto ácidos (pH entre 6.0 y 7.0) que a pH alcalino.

También, si la urea se aplica superficialmente y en condiciones secas, el nitrógeno se perderá al aire en forma gaseosa como amoníaco. La urea debe ser enterrada en suelo húmedo para lograr su acción fertilizante. Cuando se quiere que el nitrógeno suplido por la urea sea liberado lentamente, al fertilizante se le adicionan sustancias que inhiben temporalmente la acción de la ureasa (Wayne, 2001). Uno de estas sustancias es la dicyandiamida, un químico que aplicado al suelo o a los granos del fertilizante inhibe la acción nitrificante de las bacterias nitrosomas hasta por seis semanas (Camberato, 2001).

La urea puede ser usada para aplicaciones foliares de nitrógeno a las plantas, sin embargo, antes se debe determinar su contenido de biuret; si tiene menos del 1 % puede ser usada para aplicación foliar. En el cultivo de fresa se aplican hasta 5 copas de 25 ml de urea por bomba de 18 litros.

Nitrato de amonio (NH_4NO_3) Este fertilizante contiene 33.5 % de nitrógeno, del cual la mitad es amonio y la otra mitad es nitrato. Cuando es aplicado al suelo, el nitrato pasa al agua del suelo y se vuelve inmediatamente disponible para las plantas; mientras que, por lo menos una parte del amonio se adhiere a los coloides del suelo donde queda almacenado, siendo liberado poco a poco después. Debido a esto, resulta muy ventajoso el uso de este fertilizante. Es muy soluble en agua y de baja toxicidad.

El nitrato de amonio acidifica los suelos y es necesario aplicar en la próxima campaña, 60 lb de carbonato de calcio por cada qq de nitrato de amonio usado.

Sulfato de amonio [$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$] Se comercializa en forma de polvo, cristales o granulado. Es soluble en agua, no combustible y de baja toxicidad. Contiene 21 % de nitrógeno en forma amoniacal, por lo que su aplicación causará la acidificación del suelo. Para neutralizar la acidez que provoca, se deberán aplicar 148 lb de carbonato de calcio por cada quintal de sulfato de amonio. La disponibilidad del azufre (21 %) es inmediata y el amonio queda como reserva a corto tiempo. Este fertilizante es idóneo para usarse en arroz bajo inundación, ya que en este medio anaeróbico el amonio se mantendrá disponible para las plantas.

Nitrato de calcio $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$. Granulado, soluble en agua, con riesgo de explosión si se golpea o calienta. Contiene 15.5 % de nitrógeno y 19 % de calcio. Por su solubilidad y alta asimilación, es ideal para aplicarlo por riego o foliar. No acidifica el suelo.

Fosfatos de amonio: Aunque estos fertilizantes son considerados más como fuentes de fósforo, también tienen contenidos importantes de nitrógeno. El **fosfato monoamónico o MAP** (11 % de nitrógeno y 52 % de P_2O_5), el **fosfato diamónico o DAP** (18 % nitrógeno y 46 % de P_2O_5) y el **12-24-12**, (12 % de nitrógeno en forma amoniacal, 24 % de fósforo en forma de P_2O_5 y 12 % de potasio en forma de K_2O). Los tres fertilizantes acidifican los suelos. En el caso del fosfato monoamónico se deberá aplicar 59 lb de cal para neutralizar un quintal de este fertilizante aplicado al suelo; en el caso del fosfato diamónico, será necesario aplicar 70 lb de cal y en el caso de 12-24-12, se deberá aplicar 46 lb de cal por qq del fertilizante aplicado.

5.3.2. Fósforo

El fósforo es parte de reacciones metabólicas de importancia para las plantas, como las que se dan para la obtención y almacenamiento de la energía, para la transformación de los azúcares en almidones y para la formación de azúcares de cinco carbonos (ciclo de las pentosas). Si hay falta de fósforo en este ciclo, estos azúcares no son formados y los carbonos son desviados para formación de antocianinas (pigmento de color morado). Por eso, la coloración morada en hojas es un síntoma de la deficiencia de fósforo en algunas especies de plantas (IPNI, 1994).

Al igual que el nitrógeno, este elemento es de gran movilidad dentro de las plantas, por lo que los síntomas de su deficiencia se verán primero en las hojas viejas, las cuales se tornan de un color cercano al púrpura. En el cuadro 35 se presentan las necesidades de fósforo para algunos cultivos.

Cuadro 35. Absorción de fósforo por algunos cultivos

Cultivo	Rendimiento (t/ha)	Absorción de fósforo (kg/ha de P ₂ O ₅)
Banano	55	52
Frijol	2	15
Arroz	7.8	67
Café	21	12
Tomate	90	97
Soya	4	65

Fuente: Potash & Phosphate Institute, 1994.

El fósforo es absorbido por las plantas en forma de ácido fosfórico [Fosfato di ácido (H₂PO₄⁻) y fosfato monoácido (HPO₄⁼)] y es de muy poca movilidad en el suelo, manteniéndose en el lugar donde ha sido puesto por cualquiera de sus fuentes. Se considera que se mueve 2.5 cm por año (Donahue *et al.*, 1981).

Una buena proporción del fósforo del suelo se deriva de la meteorización (descomposición) de rocas o minerales ricos en fósforo, por lo que algunos suelos tienden a tener más fósforo, dependiendo del grado de presencia de las rocas fosfóricas. Otra parte importante del fósforo en el suelo se encuentra en la materia orgánica, en fosfolípidos, ácidos nucleicos y húmicos, con contenidos que pueden oscilar entre el 25 % y 75 % (Fassbender, 1994). Esto significa que proveyendo condiciones del suelo que favorezcan la actividad de los microorganismos, se puede tener acceso a este fósforo. Microbios del suelo, como *Bacillus*, *Streptomyces*, *Penicillium*, liberan el fósforo contenido en la materia orgánica. Se ha encontrado que el uso de *Bacillus subtilis* promueve mayor absorción de fósforo por las plantas (Covarrubias-Ramírez, 2005; Ekelof, 2007).

Como ya se mencionó, la disponibilidad del fósforo para las plantas en los suelos es muy limitada debido a que tiende a formar compuestos, no absorbibles por las plantas, con otros elementos. A pH arriba de 7.0, el ácido fosfórico forma compuestos, principalmente con el calcio y magnesio. A pH debajo de 6.0, tiende a formar compuestos con el hierro, aluminio, manganeso, zinc. Debido a esto, el manejo del pH del suelo es esencial para lograr una mejor eficiencia de uso de este nutriente por las plantas. Se sabe que el espacio de pH donde el fósforo es mayormente absorbido es entre 6.0 y 6.5 (Tisdale *et al.*, 1985). A pH fuera de este rango, la eficiencia de uso de este nutriente por las plantas es muy reducida, entre el 10 % y 20 %, dependiendo del tipo de suelo. En cultivos de papa sembrados en suelos colombianos ácidos y fijadores de fósforo, se ha considerado que la eficiencia de la fertilización fosfórica oscila en un 10 %, y hay al menos un estudio que indica que, en algunos de estos suelos, esta eficiencia puede llegar a ser menor al 3 % (García y Pantoja, 1998). Debido a esto, dosis tan altas, como 800 kg/ha de P_2O_5 , son comunes en cultivos de papa sembrados en estos suelos.

Determinación de la dosis de fertilización fosfórica

En las zonas altas de Honduras, el contenido de fósforo en los suelos es muy bajo (2 a 5 mg/kg, acetato de amonio 1N), esto, posiblemente, porque gran parte se encuentra retenido, formando compuestos con el aluminio y el manganeso, a juzgar por su alta acidez y alto contenido de estos elementos. De acuerdo con el laboratorio de la FHIA, se considera que el contenido de este elemento en el suelo es adecuado cuando se encuentra en un rango entre 10 y 20 mg/kg de suelo (extraído mediante acetato de amonio 1 N, pH: 4.8).

Cuando se aplica fósforo a estos suelos mediante la fertilización, una parte se adherirá fuertemente a los puntos de fijación (coloides con carga positivas) y otra formará fosfatos de aluminio, hierro y manganeso, quedando solo una minúscula parte en el agua del suelo para las plantas. Esta alta fijación de fósforo por los suelos es un problema a nivel mundial y ha sido estudiado ampliamente. En la figura 18 se presenta la proporción entre el fósforo en la solución del suelo vs. el adsorbido en un suelo de Carolina del Norte, Estados Unidos.

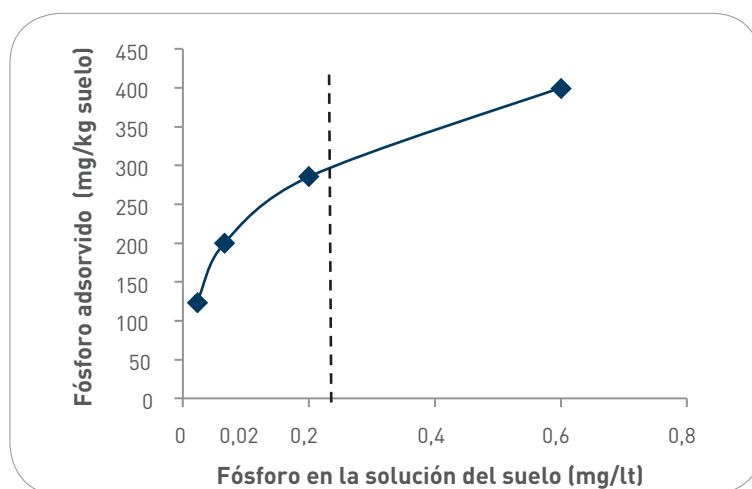


Figura 18. Relación entre el fósforo en solución y el adsorbido en un suelo arcilloso y altamente meteorizado de Carolina del Norte, Estados Unidos.

Fuente: Fox y Kamprath, 1970.

En el gráfico se puede observar que, inicialmente, un pequeño incremento del fósforo en la solución conlleva una gran cantidad de fósforo adsorbido.

Esta situación explica por qué muchas veces hay falta de respuesta por los cultivos a la fertilización fosfórica en las zonas altas de Honduras. Por ejemplo, en la figura 19 se puede observar que a pesar de la aplicación de 250 kg/ha de P_2O_5 al momento de la siembra, las plantas de papa presentaron bajos niveles de fósforo en hojas, a partir de los 30 días después de la siembra. En otro estudio en el mismo suelo (figura 20), una dosis de 540 kg/ha de fósforo (P_2O_5) no fue suficiente para las plantas de papa en evaluación, lo que se deduce por el hecho de que el gráfico no alcanzó la inclinación típica de cuando la dosis de fertilizante se vuelve excesiva. Esto nos indica que mucho del fertilizante aplicado sirvió para neutralizar los puntos de adsorción, quedando poco para el cultivo.

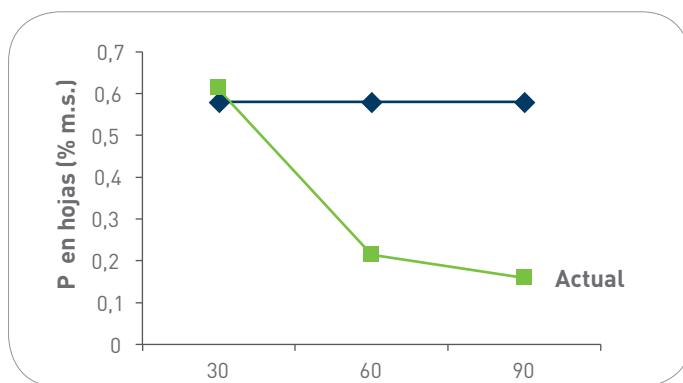


Figura 19. Contenido de fósforo en hojas a los 30, 60 y 90 días en plantas de papa fertilizadas con 250 kg/ha de fósforo (P_2O_5) al momento de la siembra y crecidas en un suelo arcilloso, ácido y alto en manganeso y hierro. Intibucá, Honduras.

Fuente: Herrera, 2004.

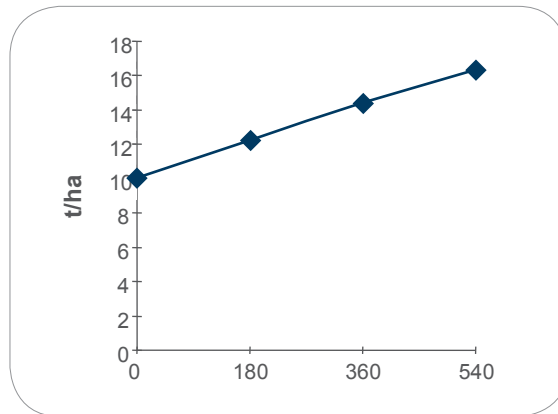


Figura 20. Efecto de niveles de fósforo sobre el rendimientos de plantas de papa (var. Provento) aplicados a una sola dosis al momento de la siembra. Intibucá, Honduras.

Fuente: Herrera, 2004.

Ejemplo de determinación de la cantidad de fertilizante fosfórico a aplicar

Supongamos un suelo que tiene 5 mg/kg de fósforo (acetato de amonio 1N, pH 4.8) y pH 5.0. Necesitamos determinar la cantidad de fertilizante fosforado a aplicar en un cultivo de papa. De acuerdo con Sierra (2002) el requerimiento de fósforo del cultivo de papa es de 67 kg/ha de P_2O_5 .

El contenido normal de fósforo en el suelo oscila entre 10 y 20 ppm (acetato de amonio 1 N). Esto significa que el contenido de fósforo en este suelo es muy bajo.

	P (mg/kg)
Bajo	< 10
Medio	10 – 20
Alto	> 20

Interpretación del contenido de fósforo en suelo obtenido mediante acetato de amonio 1 N, pH 4.8 (Según FHIA)

También vamos a considerar que este suelo se encuentra en la zona alta de Intibucá; lo que significa que tiene excesivas concentraciones de aluminio y/o manganeso; por tanto, la eficiencia del fertilizante fosforado será, máximo, 10 %. También consideraremos que este es un suelo franco (igual cantidad de arcilla, limo y arena) y que por eso su densidad aparente es de 1330 kg/m^3 . Trabajaremos con una profundidad de 20 cm, esto porque a esa profundidad están la mayoría de las raíces de las plantas hortícolas.

1. Neutralización de los puntos de fijación

Debido a que estos suelos presentan alta fijación de fósforo, sería necesario aplicar una alta dosis inicial de fósforo. Dosis altas de fósforo implica un enorme gasto para el productor y para el país, ya que el fósforo se compra al extranjero. Sin embargo, una forma más idónea de reducir la capacidad fijadora del suelo es mediante la aplicación de 10 t/ha de gallinaza (150 qq/mz), dos meses antes de la siembra para que los ácidos orgánicos (húmicos y fúlvicos) liberados de la descomposición de la gallinaza atrapen y acomplejen el manganeso y aluminio, reduciendo así la fijación del fósforo (Sibanda y Young, 1986). Aunque el costo de esta dosis inicial de gallinaza es alto, hay que recordar que esta provee beneficios adicionales al suelo, como el incremento de la materia orgánica, reducción de la acidez e incremento en el contenido de la mayoría de nutrientes requeridos por las plantas. Esta dosis de gallinaza inicial solo se aplica una vez, ya que en lo sucesivo solo se requerirá una dosis anual de mantenimiento, 3.2 t/ha (50 qq/mz).

La gallinaza se aplicará al menos dos meses antes de la siembra para permitir que esta reaccione con el suelo.

2. Determinación del requerimiento de fósforo

a) Cantidad de fósforo requerida para elevar su concentración en el suelo a un nivel medio. Esto para evitar empobrecer el suelo.

- Fósforo en suelo según el análisis químico: 5 mg/kg
- Nivel mínimo requerido en el suelo: 10 mg/kg
- Requerimiento: 5 mg/kg

b) Pasamos estos 5 mg/kg de fósforo requeridos a kg/ha, para lo cual se necesita conocer el peso de la capa arable:

- Peso de la capa arable de una ha de un suelo franco con una densidad aparente (da) de 1.33 gr/cm³, que es igual a 1330 kg/m³.

Peso de la capa arable en 1 ha= volumen x densidad aparente

Volumen de 1 ha: 100 m x 100 m x 0.2 m= 2000 m³

Peso de la capa arable= 2000 m³ x 1330 kg/m³= 2 660 000 kg/ha

- Ahora determinamos cuántos kg de fósforo son necesarios para suplir los 5 mg/kg requeridos para llevar la concentración del P en el suelo a un nivel medio. Para eso multiplicamos los 5 mg/kg requeridos por el peso de la capa arable:

5 mg/kg x 2 660 000 kg/ha = 13 000 000 mg P/ha

Pasamos los mg a Kg: $\frac{13\,000\,000\text{ mg}}{\text{ha}} \times \frac{1\text{ kg}}{1\,000\,000\text{ mg}} \times \frac{13\text{ kg P/ha}}{1}$

Debido a que los fertilizantes presentan el contenido de fósforo en forma de P_2O_5 , resultará más conveniente si transformamos estos 13 kg/ha de fósforo a la forma P_2O_5 :

Usando la tabla periódica encontramos que el peso atómico del fósforo es 31 y el del oxígeno es 16. La fórmula química del P_2O_5 , nos indica que hay 2 átomos de fósforo por 5 de oxígeno en cada molécula de P_2O_5 . Entonces:

$$\begin{array}{r} 31 \times 2 = 62 \\ 16 \times 5 = 80 \\ \hline \text{Total} = 142 \end{array}$$

Lo anterior significa que en 142 de P_2O_5 hay 62 de fósforo. Entonces, ¿A cuánto equivale en P_2O_5 los 13 kg de fósforo requeridos para llevar el fósforo del suelo a un nivel medio?

$$\begin{array}{r} 142 \text{ P}_2\text{O}_5 \quad \text{_____} \quad 62 \text{ de fósforo} \\ X \quad \text{_____} \quad 13 \text{ kg fósforo} \\ X = (13 \times 142)/62 = \underline{29.77 \text{ kg de P}_2\text{O}_5/\text{ha}} \end{array}$$

c) Requerimiento total de fósforo

A los 29.77 kg de P_2O_5 obtenidos anteriormente y que servirán para llevar el contenido de fósforo en el suelo a un nivel medio, hay que sumarle los 67 kg de P_2O_5 que requiere el cultivo.

$$29.77 \text{ kg} + 67 \text{ kg} = 96.67 \text{ kg}$$

3. Cantidad de fertilizante a aplicar

Aunque aún no se ha determinado en qué proporción se reduce la adsorción del fósforo como consecuencia de la aplicación de gallinaza en los suelos de las zonas altas de Honduras, estudios en otras regiones del mundo y en suelos similares indican que la adsorción de fósforo por plantas se incrementa hasta un 100% cuando se ha aplicado estiércol (Tani *et al.*, 2010). Partiendo de los anterior, consideraremos una eficiencia del fertilizante de 50 % (si no aplicáramos gallinaza como tratamiento correctivo, la eficiencia sería de un 10 %).

Entonces:

Convertimos los 96.67 kg/ha requeridos a kg/ha de fertilizante. Como fuente de fósforo usaremos el fertilizante 18-46-0, que significa que contiene 18 % de nitrógeno y 46 % de fósforo en forma de P_2O_5 .

$$\begin{array}{r}
 100 \text{ de } 18-46-0 \text{ _____ } 46 \text{ de } P_2O_5 \\
 X \text{ _____ } 96.67 \text{ kg } P_2O_5 \\
 X = (96.67 \times 100)/46 = 210.15 \text{ kg de } 18-46-0/\text{ha}
 \end{array}$$

Considerando que un 50 % de este fertilizante estará disponible para las plantas:

$$\begin{array}{r}
 100 \text{ } 18-46-0 \text{ _____ } 50 \text{ es disponible para las plantas} \\
 X \text{ _____ } 210.15 \text{ kg} \\
 X = (210.5 \times 100)/50 = \underline{421 \text{ kg de } 18-46-0/\text{ha}} \text{ (6.5 qq/mz)}
 \end{array}$$

Debido a que el fertilizante usado también contiene nitrógeno, será necesario considerarlo. Por tanto, determinaremos cuánto nitrógeno se aplica con el 18-46-0 usado para suplir el fósforo:

$$\begin{array}{r}
 100 \text{ de } 18-46-0 \text{ _____ } 18 \text{ de nitrógeno} \\
 421 \text{ kg } 18-46-0 \text{ _____ } X \\
 X = (421 \times 18)/100 = \underline{75.78 \text{ kg de nitrógeno}}
 \end{array}$$

Formas de aplicación de los fertilizantes fosfóricos

En la situación en que se encuentran actualmente los suelos de las zonas altas de Honduras, que son de alta fijación del fósforo, la forma más apropiada de aplicación del fertilizante es en banda al fondo del surco de siembra o a unos 5 cm al lado. De acuerdo con Dabin (1980), reduciendo el contacto entre el fósforo del fertilizante y el suelo, se reduce la fijación. Si el pH está entre 6.0 y 6.5, parece ser que las aplicaciones al voleo resultan igual de eficientes que las aplicaciones en banda. Esto porque a este pH la condición de fijación del fósforo del suelo se reduce mucho. También, si el pH es corregido, aplicaciones del fósforo a través del riego pueden resultar efectivas.

En 2011 se desarrolló un estudio en la zona alta de Intibucá para determinar la efectividad de tres formas de aplicación de 300 kg/ha de fósforo (en forma de P_2O_5) sobre la producción de plantas de papa variedad Provento (Toledo, 2011). No hubo efecto sobre los rendimientos ni en la concentración de este nutriente en hojas entre la aplicación en banda y mediante el riego (cuadro 36) lo que indicaría que cualquiera de estas formas de aplicación es adecuada. Sin embargo, los contenidos de manganeso y zinc en hojas, 70 días después de la siembra, fue un tanto reducida cuando el fósforo se aplicó a través del riego. Esto revelaría que hubo acomplejamiento del fósforo con el manganeso y zinc (formas en que la planta no puede absorberlos) cuando el fósforo fue aplicado a través del riego, tal como se esperaba. No obstante y a pesar del acomplejamiento entre el fósforo y el manganeso y zinc, el contenido de fósforo en hojas estuvo dentro de lo normal. Esto se debe a que el suelo sobre el que se desarrolló el estudio fue enmendado con 10 t/ha de gallinaza (150 qq/mz) tres meses antes de la siembra, lo que

pudo causar que el suelo tuviera suficiente fósforo para la planta y para ser fijado. La afinidad entre el fósforo y el zinc y manganeso es conocida y de hecho el fósforo puede ser usado para reducir las toxicidades de manganeso en plantas (Nielsen *et al*, 1992; Rosas *et al*, 2011), aunque resultaría muy costoso.

Cuadro 36. Efecto de formas de aplicación de 250 kg/ha de fósforo (P₂O₅) a plantas de papa (Var. Provento) crecidas en un suelo arcilloso, ácido y con alto contenido de manganeso y hierro. Intibucá, Honduras.

Forma de aplicación de 250 kg/ha de fósforo (P ₂ O ₅)	Nº tubérculos en 12 m ²	Rendimiento total (t/ha)	Rendimiento de primera calidad (t/ha)	Fósforo en hojas a los 36 días (%)
Todo a la siembra	383.7 a	39.1 a	27.4 a	0.78
Mitad a la siembra y mitad a los 30 días después de siembra	380.0 a	35.3 a	23.9 a	0.78
Mitad a la siembra y el resto por el riego por goteo a partir de los 30 días después de siembra	427.7 a	39.8 a	26.3 a	0.78
Probabilidad	n.s.*	n.s.	n.s.	-

* Diferencias no significativas estadísticamente.

Fuente: Toledo 2011.

Fertilizantes fosfóricos

Estos se obtienen a partir de la roca fosfórica acumulada en diversos lugares del mundo. La roca fosforada es triturada y mezclada con ácidos, como el sulfúrico, nítrico y fosfórico. Esto da como resultado la obtención de fertilizantes con diferentes concentraciones de fósforo.

Superfosfato simple (SPS) Ca(H₂PO₄)₂. Se comercializa en forma de polvo y granulado y contiene 18 % de P₂O₅, 26 % de azufre y 20.4 % de calcio. Es de lenta liberación por lo que es ideal para usarse en cultivos de ciclo largo, ya que los nutrientes que aporta se mantienen como reserva a mediano plazo. Es de bajo nivel de lixiviación (lavado de los nutrientes por el agua).

Superfosfato triple (SPT) Ca(H₂PO₄)₂. Se comercializa en forma granular con un contenido de 48 % de P₂O₅, 13 % azufre y 13.5 % de calcio. Libera los nutrientes en un tiempo más corto que el superfosfato simple. Es de bajo nivel de lixiviación.

Tanto el superfosfato simple como el triple reducen excesivamente el pH en la zona adyacente al fertilizante (pH: 1.0). Debido a esto, el uso de estos fertilizantes en suelos ácidos podría provocar alguna pérdida de fósforo cuando el fertilizante está recién aplicado debido a que el ácido fosfórico podría formar compuestos de hierro, aluminio, manganeso y zinc, formas que las plantas no pueden absorber. Sin embargo, estos cambios en el pH son temporales y se da

en el suelo en contacto con los gránulos del fertilizante y no afectan el pH general del suelo. Cuando se usan estos fertilizantes, es necesario mantener un programa de encalado permanente para neutralizar la acidez que estos provocan.

Fosfato monoamónico (MAP) $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$. En polvo o cristales, no combustible, de baja toxicidad y soluble en agua. Contiene 12 % de nitrógeno y 61 % de P_2O_5 . Debido a que es un fertilizante de rápida liberación de los nutrientes, es adecuado para cultivos de ciclo corto (hortalizas) o para situaciones en las que se requiere rápida asimilación de los nutrientes por las plantas. Debido a su alta solubilidad en agua es sensible a lixiviarse, por lo que debe aplicarse en pequeñas dosis. En el suelo produce una fuerte acidificación temporal en las zonas adyacentes al fertilizante (pH: 3.47). Este cambio en el pH solo se da en el suelo en contacto con los gránulos del fertilizante y no afectan el pH general del suelo.

Fosfato diamónico (DAP) $(\text{NH}_4)_2\text{H}_2\text{PO}_4$. Se vende como 18-46-0. Granulado, no combustible, baja toxicidad y soluble en agua, aunque en menor proporción al MAP, por lo que es de menor lixiviación. Contiene 18 % de nitrógeno y 46 % de P_2O_5 . En el suelo produce temporalmente, en la zona adyacente al fertilizante, un incremento del pH (7.98). Esto hace que el uso de este fertilizante sea adecuado para usarse en suelos ácidos, ya que esta alcalinidad en la zona del fertilizante disminuye la concentración del hierro y aluminio.

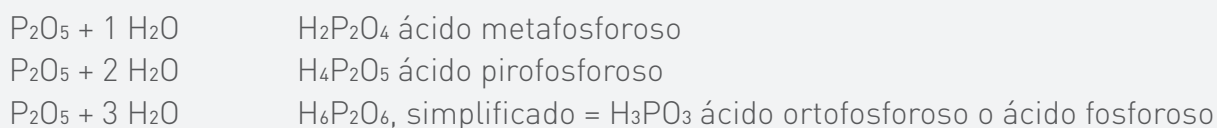
La fórmula completa 12-24-12. Contiene 12 % de nitrógeno en forma amoniacal, 24 % de fósforo en forma de P_2O_5 (parcialmente soluble en agua) y 12 % de potasio en forma de K_2O (soluble en agua). Este fertilizante acidifica los suelos, por lo que será necesario aplicar en la próxima campaña 46 lb de cal por qq del fertilizante aplicado, para neutralizar la acidez que forma en el suelo.

Fosfato mono potásico KH_2PO_4 . Granulado o en polvo, baja toxicidad y soluble en agua. Contiene 52 % de P_2O_5 y 34 % de K_2O . Es sensible a lixiviarse.

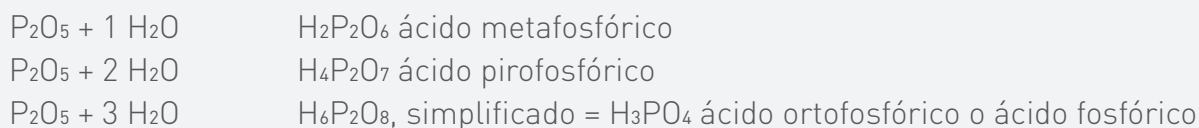
Ácido fosfórico H_3PO_4 . Líquido, inodoro, de color claro y con un contenido de P_2O_5 de entre el 52 y 54 %. Es altamente soluble en agua. También se le utiliza para neutralizar la alcalinidad o basicidad del agua de riego. Este fertilizante provoca acidez en los suelos.

¿**De dónde viene el P₂O₅**? Se le denomina “difósforo pentóxido”, “óxido de fósforo V”, “anhídrido fosfórico”. Inicialmente, los químicos determinaban el contenido de fósforo en los materiales fertilizantes en forma de P₂O₅. Actualmente se ha convenido seguir expresando el contenido de fósforo en los fertilizantes en forma de óxido de fósforo (P₂O₅). El fósforo en forma anhidro (P₂O₅) reacciona rápidamente con el agua para formar diversos tipos de ácido fosfórico (que es la forma en que lo absorben las plantas), de la siguiente forma:

Cuando actúa con su valencia más baja, 3:



Cuando actúa con su valencia más alta, 5:



5.3.3. Potasio

Este es absorbido por las plantas como ion monovalente, K⁺. Las plantas usan el potasio en cantidades iguales a las del nitrógeno. En el cuadro 37 se pueden observar las necesidades de potasio por algunos cultivos.

El potasio en las plantas promueve una adecuada fotosíntesis, ya que afecta la apertura y cierre de los estomas (más entrada de CO₂), tiene actividad directa en el transporte y translocación de nitrato y carbohidratos dentro de la planta, es activador de muchas enzimas, confiere a las plantas resistencia al ataque de hongos, heladas y a la falta de agua (Britto y Kronzucker, 2008; Krauss, 2000; Potash & Phosphate Institute, 1994). Además, el potasio está relacionado con el uso eficiente del nitrógeno por el metabolismo de las plantas. Una nutrición sin el balance adecuado entre nitrógeno y potasio dará lugar a problemas metabólicos y fitopatológicos en los cultivos. Por ejemplo, en un estudio con plantas de tabaco se encontró que plantas con suficiente potasio usaron, en un lapso de cinco horas, el 35 % del nitrógeno en la elaboración de proteínas, contra solo el 11 % en plantas deficientes en potasio (Krauss, 2000). De la misma forma, se encontró que plantas de arroz con deficiencia de potasio acumularon en sus hojas más del doble de nitrógeno soluble y azúcares (la materia prima para la elaboración de proteínas) que las plantas suplidas con suficiente potasio (se acumuló debido a que se redujo la producción de aminoácidos) (Krauss, 2000). En el aspecto de resistencia a

enfermedades, se ha encontrado que plantas de arroz con exceso de nitrógeno y deficientes en potasio presentan mayor susceptibilidad al daño por los fitopatógenos *Helminthosporium*, *Piricularia*, *Thanatephorus* y *Xanthomonas* (Krauss, 2000).

Cuadro 37. Potasio absorbido por algunos cultivos.

Cultivo	Rendimiento (t/ha)	Potasio absorbido como K ₂ O (kg/ha)
Banano	40	1000
Café	1.5	130
Maíz	6	120
Papa	40	310
Arroz	6	130
Soya	3	150
Tomate	50	286

Fuente: Potash & Phosphate Institute, 1994.

En cereales se considera que una relación adecuada de nitrógeno potasio es 1:1; sin embargo, en tubérculos y muchas hortalizas, la absorción de potasio puede llegar a ser mayor que la del nitrógeno (Krauss, 2000).

Debido a que el potasio es requerido para transporte de carbohidratos, esto hace que, en general, los cultivos de granos requieran mayor cantidad de potasio en la primera mitad del ciclo, ya que en este período estos cultivos transportan muchos carbohidratos a las raíces. Kant y Kafkafi (2000) hacen una revisión bibliográfica del tema e indican que al momento en que el maíz acumuló la mitad de su biomasa, el cultivo ya ha absorbido el 95 % del potasio y solo el 65 % y 56 % del nitrógeno y fósforo, respectivamente. El maíz absorbe el 59 % de su requerimiento de potasio entre la etapa de seis hojas y la emisión de las flores masculinas (figura 21). En el caso del arroz, el 75 % de su requerimiento de potasio es absorbido antes de la etapa de embarrigado y el resto, antes de la formación del grano. Situación similar se da en los cultivos de soya y trigo. En tomate, la absorción de potasio disminuye después de que los frutos están cerca de la maduración (figura 22). En cultivos de tallo y raíces (caña de azúcar, yuca, papa) se da lo contrario, estos absorben más potasio a partir de la segunda mitad del ciclo, ya que, como en la papa, en este período hay un transporte vigoroso de carbohidratos hacia los tubérculos y raíces. En el caso de los árboles frutales (durazno, manzano, lichi), estos presentan una absorción constante de potasio durante todo el período de crecimiento, reduciéndose solo a partir de la floración (Kant y Kafkafi, 2000).

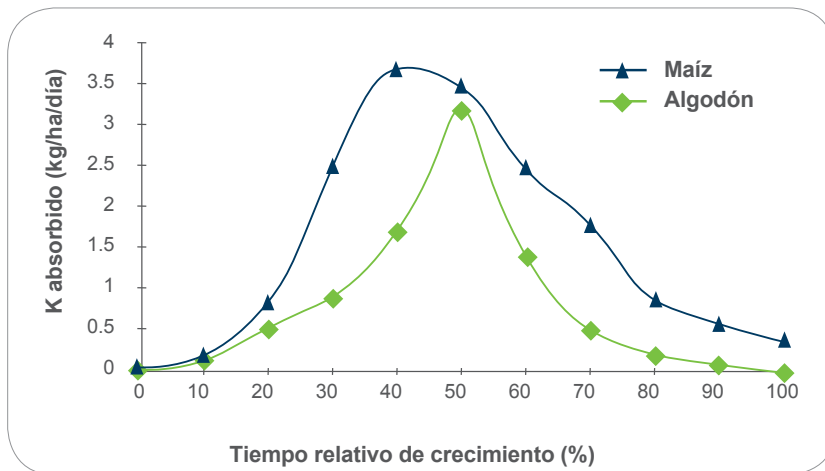


Figura 21. Tasa de absorción de potasio (K) en maíz y cultivo del tomate.

Fuente: Kant y Kafkafi 2000.

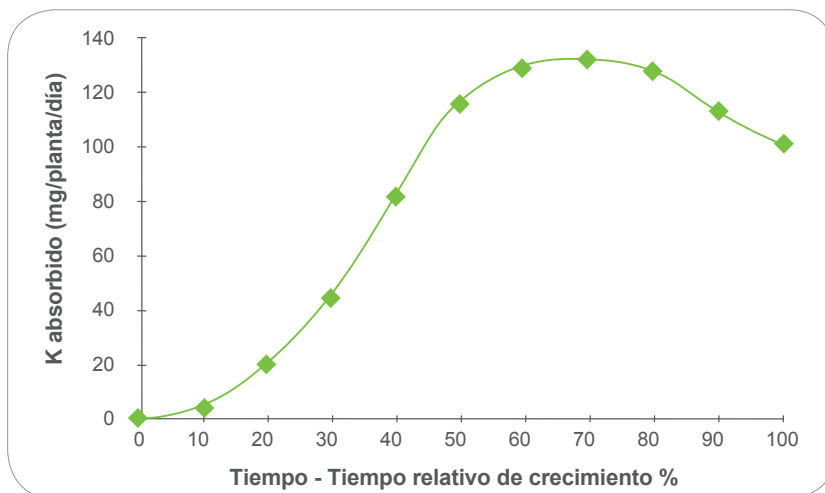


Figura 22. Potasio (K) absorbido en el cultivo de algodón.

Fuente: Kant y Kafkafi 2000.

Un alto contenido de potasio en el suelo no significa que esté disponible para las plantas. En realidad solo una pequeña fracción está disponible. Mucho de este potasio se encuentra formando parte de la estructura de ciertos minerales y solo se volverá disponible cuando estos minerales se meteoricen (descompongan). Sin embargo, estos procesos de meteorización son lentos, llevan años, por lo que es mejor no considerarlo. Otra fracción es la del **potasio lentamente disponible**, y es el que queda atrapado entre capas de arcilla. Este potasio es fuertemente retenido por lo que, prácticamente, es una pérdida. Esta forma de fijación es muy alta en suelos barrialosos, que se rajan cuando están secos (alto contenido de montmorillonita). En este caso también, es mejor no considerarlo. Y la otra fracción es la del **potasio disponible**, que es el que se encuentra en el agua del suelo y el que está retenido en los coloides (intercambiable). Este es el potasio con el que debemos contar y por lo cual, los planes de fertilización deben estar basados sobre esta fracción de potasio en el suelo.

Además, para la elaboración de los planes de fertilización potásica se deben considerar, también, otros aspectos como la CIC y la textura del suelo. Suelos arcillosos y con alta CIC requerirán una mayor cantidad inicial de potasio que suelos arenosos y de baja CIC. Bugarin *et al.* (2007) en México, encontraron que cuando se aplica potasio al suelo, este ocupa rápidamente los espacios de los coloides (potasio intercambiable) y espacios en el interior de las arcilla (potasio no intercambiable) hasta quedar en equilibrio con el potasio en la solución del suelo. Suelos con pocos espacios de intercambio (de baja CIC, como los suelos arenosos) requerirán menor cantidad de potasio para lograr el equilibrio con la solución del suelo; mientras que los suelos con mayor cantidad de espacios de intercambio (mayor CIC, como los suelos arcillosos) requerirán más potasio para lograr una adecuada concentración en la solución del suelo, que es de donde finalmente lo extraen las plantas. Los autores indican que suelos arcillosos desaturados (deficientes en potasio), podrían no presentar respuesta a la fertilización potásica debido a que el potasio agregado se difunde hacia la reserva de potasio no intercambiable, donde es retenido más fuertemente, a menos que la dosis aplicada sea suficiente para saturar todas las reservas.

Por otro lado, se debe considerar que la absorción de potasio por las plantas es afectada por la presencia de calcio y magnesio en el suelo, ya que estos tres nutrientes compiten por lugares en los coloides. A raíz de esto, se recomienda considerar las concentraciones del calcio y magnesio en los planes de fertilización. Este aspecto se aclaró en los capítulos relacionados con los coloides.

Ejemplo de la determinación de la necesidad de potasio para las plantas

Supongamos un suelo franco con densidad aparente de 1.33 gr/cm³ (que es igual a 1330 kg/m³), que presenta 180 mg/kg de potasio (acetato de amonio 1N, pH 4.8). Necesitamos determinar la cantidad de potasio a aplicar en un cultivo de tomate con un requerimiento de 150 kg de potasio en forma de K₂O (para producir 30 t/ha de tomates).

Dado que el contenido de potasio en este suelo es bajo, será necesario una dosis de fertilizante adicional para elevar su concentración a un nivel medio, esto para evitar empobrecer aún más el suelo.

Interpretación del contenido de potasio en suelo obtenido mediante acetato de amonio 1 N, pH 4.8 (según FHIA)

	K (mg/kg)
Bajo	< 250
Medio	250 – 350
Alto	> 350

1. Determinación del requerimiento de potasio

a) Cantidad de potasio requerido para elevar su concentración en el suelo a un nivel medio

- K en suelo según el análisis químico: 180 mg/kg
- Nivel mínimo requerido en el suelo: 250 mg/kg
- Requerimiento: 70 mg/kg

Pasamos los 70 mg/kg de potasio requeridos a kg/ha:

- Determinamos el peso de la capa arable de una ha. Como el suelo es franco consideraremos una densidad aparente (d_a) de 1.33 gr/cm^3 , que es igual a 1330 kg/m^3 y una profundidad de 20 cm (0.20 m).

Peso de la capa arable en 1 ha= volumen x densidad aparente

$$\text{Volumen de 1 ha: } 100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 0.2 \text{ m} = 2000 \text{ m}^3$$

$$\text{Peso de la capa arable} = 2000 \text{ m}^3 \times 1330 \text{ kg/m}^3 = \underline{2\,660\,000 \text{ kg/ha}}$$

- Determinamos cuántos kg de potasio son necesarios para suplir los 70 mg/kg requeridos para llevar la concentración del K en el suelo a un nivel medio.

$$70 \text{ mg/kg} \times 2\,660\,000 \text{ kg/ha} = 186\,200\,000 \text{ mg k/ha}$$

$$\text{Pasamos los mg a kg: } \frac{186\,200\,000 \text{ mg}}{\text{ha}} \times \frac{1 \text{ Kg}}{1\,000\,000 \text{ mg}} = \underline{186.2 \text{ kg Kg/ha}}$$

Transformamos los 186.2 kg/ha de potasio a la forma K_2O , ya que es la forma en que los fertilizantes presentan el contenido de potasio. Para esto, usamos los pesos atómicos de los componentes del K_2O . El peso atómico del potasio es 39 y el del oxígeno es 16. La fórmula química del K_2O indica que hay 2 átomos de potasio por 1 de oxígeno en cada molécula de K_2O . Entonces:

$$\begin{array}{r} 39 \times 2 = 78 \\ 16 \times 1 = 16 \\ \hline \text{Total} = 94 \end{array}$$

Lo anterior significa que en 94 de K_2O hay 78 de potasio. Entonces, ¿A cuánto equivale en K_2O los 186 kg de potasio del suelo?

$$\begin{array}{r} 94 \text{ K}_2\text{O} \quad \text{_____} \quad 78 \text{ de potasio} \\ X \quad \text{_____} \quad 186.2 \text{ kg de potasio} \\ X = (186.2 \times 94) / 78 = \underline{224.4 \text{ kg de K}_2\text{O}} \end{array}$$

b) Requerimiento total de potasio

A los 224.4 kg/ha de K₂O requeridos para llevar el contenido de potasio en el suelo a un nivel medio, hay que sumarle los 150 kg de K₂O requerimiento del cultivo.

$$224.4 \text{ kg} + 150 \text{ kg} = \underline{374.4 \text{ kg}}$$

2. Cantidad de fertilizante a aplicar

Usaremos como fuente de potasio el cloruro de potasio o KCl (60 % de K₂O), considerando una eficiencia del fertilizante del 60 %. Entonces:

$$\begin{array}{l} 100 \text{ de KCl} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad 60 \text{ de K}_2\text{O} \\ X \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad 374.4 \text{ kg K}_2\text{O} \\ X = (374.4 \times 100)/60 = \underline{624 \text{ kg de KCl/ha}} \end{array}$$

Considerando que solo un 60 % de este fertilizante será disponible a las plantas:

$$\begin{array}{l} 100 \text{ de KCl} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad 60 \text{ es disponible para las plantas} \\ X \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad 624 \text{ kg requeridos} \\ X = (624 \times 100)/60 = \underline{1040 \text{ kg de KCl/ha (16 qq/mz)}} \end{array}$$

Fuentes de potasio

Nitrato de potasio KNO₃. En polvo o cristales transparentes. Es soluble en agua, de baja toxicidad, con riego de fuego o explosión cuando es calentado o golpeado. Contiene entre 12% y 15 % de nitrógeno y entre 40% y 45 % de potasio en forma de K₂O.

Sulfato de potasio K₂SO₄. En polvo o cristales, es soluble en agua, de baja toxicidad. Contiene 50 % de K₂O y 17 % de azufre.

Cloruro de potasio KCl. En cristales o granulado. Soluble en agua, no combustible y de baja toxicidad. No acidifica el suelo y contiene 60 % de K₂O y 47 % de cloro. Su alto contenido de cloro puede limitar su uso ya que puede causar toxicidad a cultivos sensibles y, por su afinidad con el sodio (Na) del suelo, puede causar salinidad, principalmente en zonas de baja precipitación (menos de 350 mm al año).

5.3.4 Calcio

El calcio es absorbido por las plantas en su forma iónica divalente, como Ca^{+2} . Debido a que es poco móvil dentro de la planta, su deficiencia se observa primero en las hojas más jóvenes, como amarillamientos y, lo más característico, las puntas “quemadas”. La absorción de este nutriente por algunas especies cultivadas se presenta en el cuadro 38.

El calcio es un estimulante del crecimiento radicular, forma parte de la pared celular y es activante de enzimas. Este elemento juega un papel importante en la resistencia natural de las plantas al ataque de patógenos. Las células de plantas deficientes en calcio presentan una débil pared celular, siendo fácilmente traspasadas por hongos y bacterias fitopatógenas. El calcio afecta negativamente la actividad de sustancias liberadas por los patógenos para disolver las paredes celulares de los tejidos de plantas (enzimas pectolíticas). Por ejemplo, en frijol, el calcio inhibe la actividad de las sustancias fitotóxicas liberadas por la bacteria *Erwinia carotovora*, causante de la pudrición blanda. Esto mismo se repite en lechuga con la enfermedad ocasionada por *Botrytis cinerea* y en manzano, con la enfermedad producida por *Gloesporium perennans* (Krauss, 2000).

Además, un adecuado contenido de calcio en el suelo tiene un efecto positivo en la misma estructura del suelo, ya que permite la formación de agregados, lo que, además de favorecer el desarrollo de las raíces, logra una mayor resistencia de los suelos a la erosión; esto gracias a que los agregados formados por el calcio permiten una mayor infiltración del agua (Dontsova y Norton, 1999).

El nivel de calcio en los suelos de la zona alta de Intibucá es muy bajo (cuadro 38), por lo que, en general, son requeridas altas aplicaciones de este nutriente. La disponibilidad de calcio para las plantas está muy asociado al pH del suelo, siendo muy reducida en suelos ácidos. Además, se considera que su absorción está relacionada con la presencia del magnesio y potasio en el suelo. Estos aspectos fueron aclarados en los capítulos relacionados con los coloides.

Fuentes de calcio

Las fuentes de calcio más importantes son la cal viva (71% de calcio), la cal apagada (54% de calcio), la cal dolomítica (21% calcio y 13% magnesio) y el yeso. También hay presencia de este nutriente en algunos fertilizantes como el nitrato de calcio (24% de calcio) y los fosforados, superfosfato simple (20% de calcio) y superfosfato triple (14% calcio). Sin embargo y dada la pobreza de este nutriente en los suelos ácidos, es mucho más económico suplirlo con cal.

5.3.5. Magnesio

El magnesio es absorbido por las plantas en forma iónica divalente, como Mg^{+2} . Este nutriente forma parte de la clorofila, por lo que su papel dentro de la fotosíntesis es fundamental. Su deficiencia es notoria en las hojas viejas, las cuales adquieren un tono amarillo, pero manteniendo las venas verdes. En hojas de plantas de maíz deficientes en magnesio se ven franjas amarillas paralelas al nervio central. En el cuadro 38 se muestran las necesidades de magnesio por algunos cultivos. Al igual que el calcio, este nutriente es bajo en los suelos de la zona alta de Intibucá (cuadro 39). En general, la disponibilidad del magnesio está relacionada con el pH del suelo, siendo escaso en suelo con alta acidez. También, se considera que su absorción por las plantas está muy relacionada con la presencia del amonio, calcio y potasio en el suelo, reduciéndose, si los contenidos de estos son excesivos.

Animales vacunos que consumen forrajes bajos en magnesio pueden padecer de hipomagnesemia, causada por un bajo contenido de magnesio en la sangre (Sánchez, 2000).

Fuentes de Magnesio

Sulfato de Magnesio $MgSO_4$. Polvo o cristales, soluble en agua, baja toxicidad y no combustible. Contiene 9.85 % de magnesio y 13 % de azufre.

Kmag: Fertilizante en forma de cristales de lenta degradación. Contiene 11 % de magnesio y 22 % de K_2O . Otras fuentes de magnesio son: la cal dolomítica (contenidos entre 6% y 12%), el óxido de magnesio (de 55% a 60%), sulpomag (11 %) y el cloruro de magnesio (7.5 %).

5.3.6. Azufre

Este nutriente es absorbido por las plantas en forma de sulfato, SO_4^{-2} . El azufre, al igual que el nitrógeno, forma parte de muchas proteínas y es necesario para activar la enzima que agiliza la transformación de los nitratos en aminoácidos. Cuando el azufre es escaso en el suelo, los nitratos se concentran en las hojas y se disminuye la formación de proteínas. Se considera que la relación **nitrógeno total/azufre total** en tejido de las plantas, es una buena guía para determinar si hay deficiencias de este elemento. Se mencionan varias relaciones, que van de 7/1 a 15/1 (Potash & Phosphate Institute, 1994). Excesos de nitrógeno (en especial nitratos) y fósforo en el suelo pueden provocar una reducida absorción de azufre por las plantas (Barrera, 1998). Este elemento es poco móvil dentro de la planta, por lo que su carencia se notará primero en las hojas más nuevas, las que adquieren una coloración verde pálido. En el cuadro 38 se pueden observar cantidades de azufre absorbidas por algunos cultivos. En la zona alta de Intibucá, se desconoce el contenido de este elemento en los suelos, ya que en general nadie lo solicita en los análisis químicos de suelos. El contenido de azufre en tres suelos de la zona

alta de Intibucá fue de 13, 1 y 9 mg/kg en El Tabor, El Pelón y Santa Catarina, respectivamente. El nivel normal de este elemento en el suelo debe oscilar entre 20 y 80 ppm [Si es extraído mediante fosfato monocalcico, $\text{CaH}(\text{PO}_4)_2$, extractante usado tanto por los laboratorios de la FHIA, como por el de Zamorano]], abajo del cual se puede esperar respuesta de las plantas a la fertilización azufrada. Hay que mencionar que en algunos suelos de Colombia se ha obtenido respuesta a la aplicación de azufre en cultivos de papa solo cuando el nivel de este nutriente en el suelo es menor a 5 ppm [$[\text{CaH}(\text{PO}_4)_2]$] (Guerrero 1998).

La materia orgánica es la principal fuente de azufre en los suelos, por lo que deben mantenerse condiciones del suelo que promuevan la actividad de los microorganismos. Otras fuentes de azufre son el yeso (12% a 18%), sulfato de amonio (24%), sulfato de potasio (18%), sulpomag (22%), azufre elemental (> 85%), sulfato de magnesio (14%).

Cuadro 38. Absorción de calcio, magnesio y azufre de algunos cultivos.

Cultivo	Rendimientos	kg/ha		
	t/ha	Calcio	Magnesio	Azufre
Arroz	8	23	16	14
Maíz	10	43	58	30
Sorgo	9	67	45	44
Soya	4	29	27	22
Tomate	90	33	40	60

Fuente: Potash & Phosphate Institute 1994.

Cuadro 39. Contenido de calcio y magnesio en suelos de la zona alta de Intibucá, Honduras.

Lugar	Ca* (ppm)	Mg (ppm)
Sta. Catarina	520 B**	76 B
Sta. Catarina	890 B	142 B
Sta. Catarina	1010 B	56 B
Sta. Catarina	520 B	76 B
Sta. Catarina	610 B	100 B
Santa Catarina	860 B	166 B
Santa Catarina	220 B	60 B
Lajas	1020 B	213 N
Lajas	215 B	73 B
Pueblo Viejo	470 B	79 B
Pinares	760 B	84 B
Chogola	1400 B	157 B
El Tabor	530 B	100 B
El Pelón	240 B	59 B
Los Encinos	840 B	126 B
Los Encinos	230 B	90 B

* **Contenido normal:** Calcio (Ca): 2000 - 6000 ppm [10 - 30 cmol(+)/Kg] (acetato de amonio 1 N a pH 4.8) Magnesio (Mg): 180 - 250 ppm [1.5 - 2.0] (acetato de amonio 1 N a pH 4.8)

** B: bajo; N: normal

Fuente: FHIA.

5.3.7. Elementos menores

A pesar de que los micronutrientes son necesitados por las plantas en pequeñas cantidades, gr/ha, sin su absorción en la cantidad necesaria las plantas no pueden desarrollarse totalmente. También, los micronutrientes están directamente relacionados con la resistencia de las plantas al ataque de enfermedades (Krauss, 2000); como el cobre, que participa en la producción de lignina, sustancia que recubre la superficie externa de las plantas y dificulta la infección por fitopatógenos; o el manganeso, asociado con la producción de sustancias que proveen resistencia a las plantas, como la misma lignina y fenoles, y con la inhibición de la actividad de sustancias fitotóxicas, como las enzimas aminopeptidasa y metilesterasa, producidas por los patógenos para degradar los tejidos de las plantas; o el boro, cuya deficiencia en plantas de remolacha facilita la infección del hongo *Peronospora schachtii*, causante de la enfermedad “pudrición hueca de la raíz”.

En el cuadro 40 se presenta la remoción de micronutrientes por algunos cultivos. En el pasado se ha considerado que estos nutrientes están en el suelo en cantidades suficientes para las plantas y que no son necesarios aportes de estos mediante fertilizantes. Sin embargo, actualmente, comienzan a presentarse agotamientos en los campos cultivados alrededor del mundo (Potash & Phosphate Institute, 1994; Cruzate, 2006; Rivero, 2006). Esto debido a años y años de absorción por los cultivos sin programas o planes de fertilización permanentes que repongan los micronutrientes usados por las plantas, y que son llevados fuera de las parcelas de producción en las cosechas. Ante este hecho, los técnicos y productores deben estar más pendientes de los contenidos de los micronutrientes en sus campos. Para esto se dispone en el país de las herramientas necesarias: el análisis químico del suelo junto con el análisis de tejido, que usados en conjunto nos permiten anteponernos a situaciones de deficiencia o exceso.

Cuadro 40. Remoción de micronutrientes en la parte cosechada de varios cultivos.

Cultivo	Rendimientos	gr/ha					
	t/ha	Boro	Cobre	Hierro	Manganeso	Molibdeno	Zinc
Arroz	5	60	20	810	600	2	215
Maíz	4	36	20	120	36		60
Papa	20	120	110	715	170	2	240
Tomate	48	28	60	535	95	2	60
Cítricos	48	120	120	600	140	2	60
Alfalfa	12	600	120	1200	600	24	830

Fuente: Potash & Phosphate Institute 1994.

Los micronutrientes se pueden clasificar en catiónicos, que son los que las plantas absorben como elementos con carga positiva, los cuales son: el hierro (Fe^{+2} o Fe^{+3}), zinc (Zn^{+2}), manganeso (Mn^{+2}), cobre (Cu^{+2}); y los aniónicos, que son los micronutrientes con carga negativa, como el ácido bórico (H_3BO_3), el molibdato (MoO_4^{-2}).

La disponibilidad de los microelementos para las plantas en el suelo está muy relacionada con el pH del suelo. En general, a medida que el pH disminuye a partir de 6.0, las cantidades de hierro, manganeso, ácido bórico y zinc se incrementan, y, por el contrario, la concentración del molibdeno, disminuye. Cuando los niveles de pH de los suelos están por debajo de 5.0, podemos comenzar a sospechar una deficiencia de molibdeno y un exceso de hierro, manganeso, ácido bórico y zinc. En la zona alta de Intibucá, en suelos muy ácidos (pH debajo de 4.0) suele presentarse una enfermedad de las plantas de coliflor provocada por la deficiencia del molibdeno denominada “cola de látigo”, que provoca que las hojas se adelgacen, enlongen y se mantengan erectas.

Por el contrario, cuando el pH de los suelos está por encima de 7.0, la disponibilidad del molibdeno se incrementa y es probable que se presenten deficiencias de hierro, manganeso y zinc, y ácido bórico. En el caso del boro, además, se presentarán deficiencias en plantas en períodos secos, ya que este nutriente ingresa a la planta a través del flujo de agua que entra por las raíces (Barrera, 1998).

En el cuadro 41 se presentan los contenidos de micronutrientes en algunos suelos de la zona alta de Intibucá. En este se puede ver que el hierro está en contenidos que van de normal a alto, mientras que el manganeso, en general, se encuentra en exceso; exceptuando un suelo orgánico de la comunidad de El Pelón (conocido como “polvoso” o “limoso”, posiblemente volcánico) el cual presenta deficiencia de manganeso. Esto no es raro, ya que se sabe que suelos con excesos de materia orgánica, como en este caso (18 %), pueden presentar muy bajos contenidos de este nutriente.

El cobre, en general, se presenta de bajo a normal, al igual que el zinc. Debido a que el boro y el molibdeno no forman parte del análisis de rutina del laboratorio de suelos de la Fundación Hondureña de Investigación Agrícola (FHIA), se tiene desconocimiento de los contenidos de estos dos nutrientes, en especial el molibdeno, en los suelos de la zona alta de Intibucá. En el cuadro 41 también se presenta el contenido de boro de tres suelos de la zona, en los cuales está un tanto arriba de lo normal.

Cuadro 41. pH y contenido de materia orgánica y elementos menores en algunos suelos de la zona alta de Intibucá, Honduras.

Lugar	pH	Materia Orgánica (%)	Hierro mg/dm ³	Manganeso mg/dm ³	Cobre mg/dm ³	Zinc mg/dm ³	Boro Mg/dm ³
	5.4	3.08 B	2.4 N	54.0 A	0.40 B	0.44 B	-
Sta. Anita	6.2	3.28 B	26.0 A	62.0 A	0.64 N	3.00 N	-
Sta. Anita	5.4	2.68 B	25.0 N	46.0 A	0.58 N	0.74 B	-
Sta. Anita	5.2	2.28 B	19.0 N	41.0 A	0.66 N	0.74 B	-
Chogola	5.2	6.44 A	20.0 N	51.0 A	0.76 N	8.20 A	-
San José	5.6	5.13 A	7.2 N	43.0 A	0.38 B	2.20 N	-
Azacualpa	5.2	6.63 A	62.0 A	26.0 A	0.54 N	5.20 N	-
Sta. Catarina	5.6	4.98 N	19.2 N	68.6 A	0.66 N	0.46 B	-
Sta. Catarina	6.3	4.96 N	13.0 N	32.0 A	1.34 N	0.20 B	-
Sta. Catarina	5.4	5.62 A	17.4 N	25.2 A	2.52 N	1.60 N	0.80 A
Sta. Catarina	5.4	8.17 A	16.0 N	46.0 A	0.70 N	0.50 B	-
Sta. Catarina	5.0	5.00 N	9.7 N	22.4 A	0.42 B	0.24 B	-
El Tabor	4.8	4.96 N	10.9 N	52.5 A	1.92 N	1.12 N	0.68 A
El Pelón	4.6	18.0 A	18.6 N	1.30 B	0.24 B	0.26 B	0.96 A

Rango medio: materia orgánica= 2-4; hierro= 5-15; manganeso= 2-10; cobre= 0.5-1; zinc= 1-5; boro= 0.5-8 (micronutrientes obtenidos con DTPA)

Fuente: FHIA.

En general, los estiércoles son una buena fuente de ácido bórico, hierro y cobre. En el cuadro 42 se presenta el contenido nutricional de una gallinaza comercializada en la zona alta de Intibucá; puede verse que esta es una buena fuente de todos los micronutrientes. También pueden ser fuente de micronutrientes algunos de los fertilizantes comunes, en los cuales algunos micronutrientes están presentes como impurezas (cuadro 43).

Cuadro 42. Propiedades químicas de la gallinaza comercializada en el altiplano de Intibucá. Unidades en base a materia seca.

pH	Materia orgánica	%						ppm				
		Nitrógeno	Fósforo	Potasio	Calcio	Magnesio	Azufre	Hierro	Manganeso	Cobre	Zinc	Boro
8.5	50.3	1.4	1.5	1.7	4.9	0.66	0.41	5147	487	49.6	400	31

Cuadro 43. Contenido de micronutrientes, como impurezas, en algunos fertilizantes comunes.

Fertilizantes	Ppm				
	Cu	Zn	Mn	B	Mo
Sulfato de amonio	Trazas - 0.5	0.33	70	6	0.1
Urea	0 - 3.6	0.5	0.5	0.5	0.7
KCl	3	3	8	14	0.2
KSO ₄	5 - 10	2	2.2 - 13	4	0.2
Fosfatos amónicos	3.4	80	100 - 200	-	2
Super fosfato triple	2 - 12	50 - 100	160 - 240	530	9

Fuente: Guerrero, 1998.

Cloro (Cl). Este es un elemento esencial para las plantas ya que, entre otros aspectos, es fundamental para que se lleve a cabo la fotosíntesis. Sin embargo y debido a que no hay reportes de su deficiencia en suelos, no se considera en la mayoría de los textos sobre fertilidad de los suelos. En la zona alta de Intibucá se desconoce el contenido de cloro en los suelos.

El cloro no se encuentra libre en la naturaleza ya que, debido a su alta reactividad, siempre está formando compuestos con otros elementos. Las plantas lo absorben desde el agua del suelo como ion monovalente (Cl⁻). Su deficiencia causa amarillamientos, marchitez y necrosamiento de las hojas, raíces cortas y engrosadas.

En plantas de papa se ha encontrado que niveles en hojas debajo de 0.21 ppm, causan deficiencia. Se considera que el nivel idóneo de cloro en hojas de las plantas debe estar entre 0.21 y 6 ppm (Hernández Gil, 2001). Cultivos como el coco y la palma de aceite son sensitivos a la deficiencia de este elemento en los suelos (Potash & Phosphate Institute, 1994).

El cloro se puede encontrar en algunos fertilizantes comerciales como el KCl, que contiene cerca del 40 % de cloro; el cloruro de amonio, con 66 % de cloro; cloruro de calcio, con cerca del 50 % como cloro; cloruro de magnesio, con 74 % de cloro.

5.3.8. Otros nutrientes

Se ha dicho que los 16 nutrientes mencionados a lo largo de este documento son considerados como esenciales para el desarrollo de las plantas. Sin embargo, hay otros elementos, no considerados como esenciales, que son necesarios para algunas especies de plantas y otros que, según algunos investigadores, también deberían ser considerados como esenciales. A continuación damos una somera revisión de algunos.

Silicio (Si). El silicio es el segundo mineral más abundante en la corteza terrestre y que combinado con aluminio, magnesio, potasio, sodio, calcio, hierro, da lugar a la formación de diferentes minerales conformadores del suelo (Hernández Gil, 2001). Este elemento no se encuentra en la naturaleza como silicio, ya que siempre está formando parte de algún compuesto.

Las plantas lo absorben como H_4SiO_4 ó $Si(OH)_4$ y forma parte de las paredes celulares de la epidermis, donde contribuye a darle rigidez y elasticidad. Se considera que el silicio podría ser esencial para las plantas de los cultivos caña de azúcar, tomate y pepino. Las plantas de arroz responden a la aplicación de silicio cuando su nivel en el suelo está por debajo de 10 mg/100 g de suelo. Las plantas deficientes en silicio presentan una mayor susceptibilidad a las enfermedades (Krauss, 2000). También se considera que el silicio aplicado al suelo ayuda a disminuir las toxicidades por hierro y manganeso.

Níquel (Ni). Debido a que este elemento es resistente a la corrosión y es más duro que el hierro, se le utiliza en la industria para desarrollar materiales fuertes y de mayor duración. Es relativamente escaso y las plantas lo absorben desde la solución del suelo en forma de ion con carga positiva divalente (Ni^{+2}). El níquel está asociado con la enzima que descompone la urea a amonio y su deficiencia causa mayor susceptibilidad por las plantas a las enfermedades (Hernández, 2001; Raven *et al.*, 1992).

Cuando se ha aplicado níquel a los suelos, se ha observado una mayor efectividad de uso por las plantas del fertilizante urea. Se ha obtenido respuesta a la aplicación de níquel en los cultivos de arroz y soya.

Sodio (Na). El sodio, junto con el cloro, forman la sal común, por lo que es muy abundante en el agua de mar. Este elemento es absorbido por las plantas desde el agua del suelo en forma de ion monovalente (Na^+) y es especialmente necesario en ciertas especies de plantas tropicales denominadas C4 (maíz, caña de azúcar, sorgo, amaranto). El sodio sirve de activador de algunas reacciones metabólicas de las plantas, promueve el alargamiento de las células y, además, es capaz de sustituir al potasio (Hernández, 2002; Potash & Phosphate Institute, 1994). Su deficiencia en las plantas causa amarillamientos, necrosis y mal desarrollo de las flores. Antes se ha considerado al sodio como un elemento no esencial para las plantas, aunque actualmente se acepta que es necesario en mínimas cantidades (Thompson, 1998)

Cobalto (Co). Aunque el cobalto no se considera un nutriente esencial, este es absorbido por las plantas desde el agua del suelo como ion divalente (Co^{+2}). Se considera necesario para que las bacterias de los nódulos de las leguminosas fijen nitrógeno atmosférico (Potash & Phosphate Institute, 1994; Thompson, 1998; Hernández, 2002; Raven *et al.*, 1992). El cobalto es necesario para que las plantas sinteticen la vitamina B12. Debido a esto, el contenido de cobalto en plantas que sirven de alimento al ganado es deseable, ya que la vitamina B12 es necesaria para el metabolismo del nitrógeno de los rumiantes. Deficiencias de esta vitamina causa enfermedad en estos animales. En general, el contenido promedio de cobalto en tejido de plantas oscila entre 0.05 a 0.30 ppm. Raven *et al.* (1992) indican que a una concentración de 0.1 ppm en el tejido del forraje, deficiencias de cobalto en los animales es posible.

Cuando se considera que hay deficiencias de este elemento en el suelo, aplicaciones foliares de cobalto quelatado pueden aplicarse en dosis de 0.01 %.

5.4 Métodos para determinar las cantidades de nutrientes a aplicar a los cultivos

Hay dos formas para determinar las necesidades de nutrientes de los cultivos:

- 1) Partiendo de los resultados de experimentos** desarrollados por las estaciones experimentales en los cuales se evalúan múltiples dosis de nutrientes aplicadas al suelo, generalmente nitrógeno, fósforo y potasio, para cada cultivo de importancia y recomendando la dosis que presenta el mayor rendimiento al menor costo. La efectividad de este método dependerá de qué tanto los suelos de una zona o región son iguales a los del lugar donde se llevó o llevaron a cabo los experimentos. En el caso de los suelos tropicales y los de la zona alta de Intibucá, este método se ve limitado por la variación de sus suelos.
- 2) Partiendo de los resultados del análisis de suelo.** En este caso se determina la concentración de los nutrientes en el suelo de interés en el laboratorio y se compara con los niveles críticos (por debajo del cual hay deficiencia). Si el contenido de un nutriente está por debajo del nivel crítico, se recomienda la aplicación de este mediante fertilizantes. Para evitar que el suelo se empobrezca, se recomienda adicionar una cantidad del nutriente que eleve su contenido en el suelo hasta el nivel crítico y a partir de ahí, se adiciona la cantidad que requiere el cultivo en particular, obtenido de tablas de absorción. Estas tablas de absorción de nutrientes se han desarrollado previamente en estudios con cultivo hidropónico, para la mayoría de cultivos. Si un nutriente está por arriba del nivel crítico, no se recomienda su aplicación. La virtud de este método es que parte de la situación actual del suelo, dándonos información adicional que nos ayudará a optimizar los planes de fertilización y manejo, como el pH, CIC, materia orgánica y toxicidades. Aunque este método aún tiene ciertas limitantes, las tablas de absorción solo se limitan a una o unas pocas variedades de cada especie (unas variedades pueden requerir más nutrientes que otras) y los rangos de concentración de nutrientes considerados “normales” no se pueden generalizar para todos los suelos, en el caso de los suelos altamente variables del trópico, es el mejor método para la determinación de los planes de fertilización y manejo.

Potencial productivo y fertilización

Otro aspecto de suma importancia a considerar al desarrollar planes de fertilización es el potencial productivo de los cultivos o variedades, determinado por su condición genética. Un cultivo con bajo potencial de producción no producirá, más aún si se le aplica una mayor dosis de fertilizante. Igual, un cultivo o variedad con alto potencial de producción, requerirá mayor cantidad de nutrientes y no producirá adecuadamente si no se ponen a su disposición todos los nutrientes requeridos. Es por eso que muchas veces los requerimientos nutricionales de los cultivos se dan en función del rendimiento (por ejemplo, kg del nutriente por t de producción).

En este punto es necesario diferenciar entre absorción y extracción de nutrientes; la absorción se refiere al requerimiento de nutrientes del cultivo y extracción, se refiere a los nutrientes que son sustraídos del suelo en la parte comercializable del cultivo. La importancia de conocer la extracción de los cultivos es debido a que nos indica la cantidad de nutrientes exportados de la parcela y que debemos, al menos, reponer al suelo para evitar su empobrecimiento. En el Anexo 3, al final de este documento, se presenta la absorción y extracción de nutrientes para algunos cultivos.

6. EL ANÁLISIS QUÍMICO DEL SUELO

Todos los nutrientes deben estar en las cantidades óptimas para un mejor desempeño de los cultivos. El estado nutricional del suelo y la condición química en general, se puede determinar mediante un análisis químico.

Debido a la amplia variabilidad de los suelos del trópico, no se pueden generalizar los métodos de manejo de los suelos ni los planes de fertilización. Por eso, el análisis de suelos es una herramienta fundamental para el buen desempeño de la agricultura del trópico.

6.1 Métodos de medición

En los suelos, los nutrientes se encuentran en diferentes sitios y dependiendo de donde estén estos podrán estar disponibles o no para las plantas: **i)** los nutrientes en la solución del suelo están ya disponibles; **ii)** los nutrientes adheridos a los coloides (denominados “de intercambio”) también están ya disponibles, pues al agotarse los nutrientes en la solución estos son repuestos desde los coloides; **iii)** nutrientes que forman parte de los componentes sólidos del suelo (arcillas, limo, arena, rocas) estarán disponibles a largo plazo (años), cuando los procesos de mineralización los liberen, por lo que en la práctica y a corto plazo, no debemos considerarlos; **iv)** otros pueden estar retenidos formando compuestos con otros elementos, como los fosfatos de aluminio, hierro, manganeso, zinc, que bajo condición de acidez del suelo se mantendrán indisponibles para las plantas; o el mismo fósforo y calcio que en condiciones de alcalinidad del suelo, pueden formar compuestos de fosfato de calcio insolubles para las plantas.

Algunos métodos de análisis de laboratorio simplemente miden la concentración de nutrientes en la solución del suelo, por lo que dan una medida de disponibilidad inmediata para las plantas. Sin embargo, una mejor medida se obtiene si se cuantifica la concentración del nutriente, tanto en solución como los adheridos a los coloides. Para lograrlo, las muestras de suelo son tratadas con diferentes reactivos denominados *extractantes* cuya función es desplazar desde los puntos de adsorción (por intercambio iónico) hacia la solución del suelo, el elemento en estudio, para posteriormente cuantificarlo por diversas metodologías (especialmente *espectrometría de absorción atómica* y *colorimetría*).

Los extractantes difieren en su capacidad de extracción, y hasta hoy no hay uno que sea de uso universal, existiendo muchos y variando su efectividad de acuerdo con la condición y tipo de suelo que se analiza. Cuando se usan estos reactivos en condiciones de suelo diferentes para las que fueron creados, se pueden presentar dos situaciones: subvalorar el contenido del

nutriente debido a que el reactivo no es capaz de extraerlo de algunos sitios, o sobrevalorarlo debido a que pueden llegar incluso a solubilizar nutrientes retenidos en la estructura del suelo o los que forman compuestos insolubles con otros elementos, formas que en la realidad no estarán disponibles para las plantas. Por eso, para elegir el método de extracción adecuado, es necesario antes conocer el tipo de suelo y su condición, en especial el pH.

Un buen extractante es aquel que no presenta variaciones excesivas en sus medidas cuando se usa en un mismo tipo de suelo. Además, aspectos de trabajo de cada laboratorio afectarán también la capacidad de extracción de los reactivos, como la concentración de las soluciones, el tiempo de contacto suelo-solución, la velocidad de agitación, el tamaño del frasco de extracción, el tamaño de la muestra, etc. (Rojas, 1998).

Por eso, para poder dar recomendaciones de fertilización a partir de estos análisis de laboratorio, se requiere el conocimiento de la forma de acción de los extractantes usados. En la figura 23 se representa una forma de obtener la CIC en los laboratorios y en el cuadro 44 se presentan diferentes extractantes usados en los laboratorios para la determinación de nutrientes en el suelo.

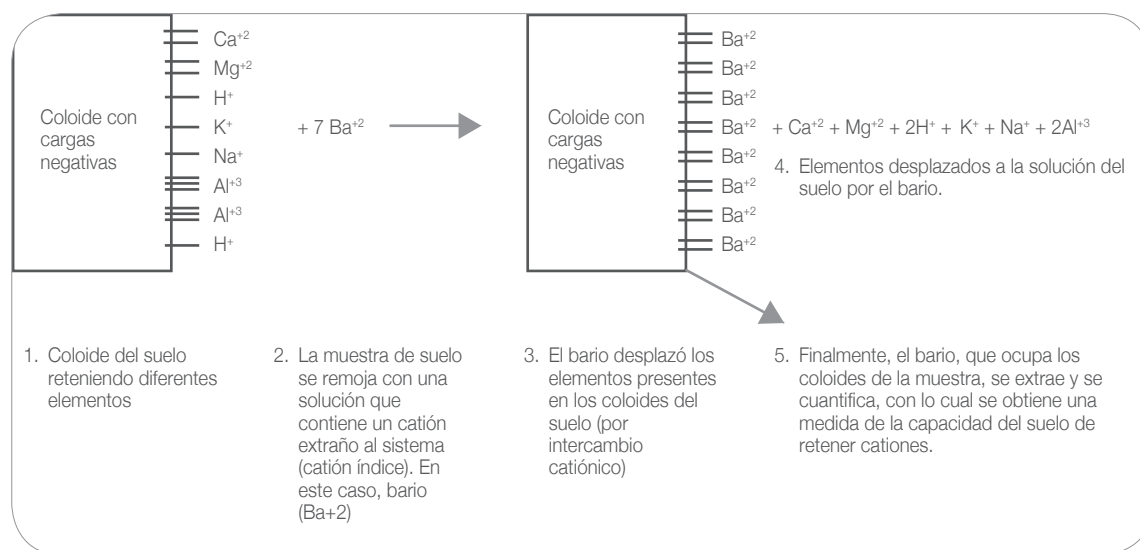


Figura 23. Esquematización de la obtención de la capacidad de intercambio catiónico de una muestra de suelo obtenido en el laboratorio mediante bario.

Fuente: Fassbender, 1994.

Cuadro 44. Algunos extractantes usados por los laboratorios para la determinación del contenido de fósforo, potasio, calcio y magnesio en suelos.

Nombre	Composición química
Fósforo	
Olsen modificado	NaHCO ₃ 0.5 N + EDTA 0.01 M, pH 8.5
Bray 1	HCl 0.025 N + NH ₄ F 0.03 N
Bray 2	HCl 0.1 N + NH ₄ F 0.03 N
Troug	H ₂ SO ₄ 0.002 N
Mehlich 1	HCl 0.05 N + H ₂ SO ₄ 0.025 N
Mehlich 3	CH ₃ COOH 0.2 M + NH ₄ NO ₃ 0.25 M + NH ₄ F 0.015 M + EDTA 0,001 M. pH 2.5
Potasio	
Olsen modificado	-
Acetato de amonio	NH ₄ OAc 1 N, pH: 7,0
Ácido nítrico	HNO ₃ 1 N
Mehlich 1	-
Mehlich 3	-
Calcio y magnesio	
Cloruro de potasio	KCl 1 N
Acetato de amonio	-
Mehlich 1	-
Mehlich 3	-

Fuente: Vargas, 1992; Rodríguez *et al.* 2005.

6.2 Determinación de nutrientes en el laboratorio

Para tener una mejor comprensión de la forma como los laboratorios obtienen sus resultados, se dan a continuación algunos ejemplos muy sintetizados.

6.2.1. Determinación del pH del suelo

- a) **En agua:** “1 parte de suelo/1 parte de agua” o “1 parte de suelo/ 2.5 partes de agua”.

Se hace una suspensión de suelo en agua destilada y luego de un tiempo (10 a 30 minutos) se determina el pH mediante un pH-metro (mide el potencial eléctrico del H^+).

Con este método se obtiene la acidez de la solución del suelo. Para una mayor confiabilidad, se requiere que las muestras se obtengan de lugares que no han sido fertilizados recientemente, ya que la concentración de sales (fertilizantes) tiende a disminuir la medida del pH. Esto mismo hace que el pH medido mediante este método sea sujeto a variaciones estacionales, pudiendo dar una medida más baja en la época seca (Campanilla y Sadzawaka, 2003; Gaitán y López, 2007).

- b) **En KCl:** a la muestra de suelo se le vierte una solución de KCl, luego de un tiempo (horas) se hace la medición con el pH-metro. En este caso, la medición corresponde a la acidez de la solución del suelo y la acidez adherida a los coloides (acidez potencial) (Campanilla y Sadzawaka, 2003; Gaitán y López, 2007). Esto es así debido a que el K^+ del KCl al entrar a la solución del suelo en mayor concentración, desplaza el H^+ y Al^{+3} adheridos a los coloides (figura 24). De ahí que el pH medido de esta forma puede dar una medida menor a la del pH en agua. A diferencia del pH en agua, este método es independiente de la presencia de fertilizante en las muestras.
- c) **En $CaCl_2$:** actúa de forma similar al KCl, es poco afectado por la presencia de fertilizante en las muestras y su medida puede ser menor a la del pH en agua (Campanilla y Sadzawaka, 2003).

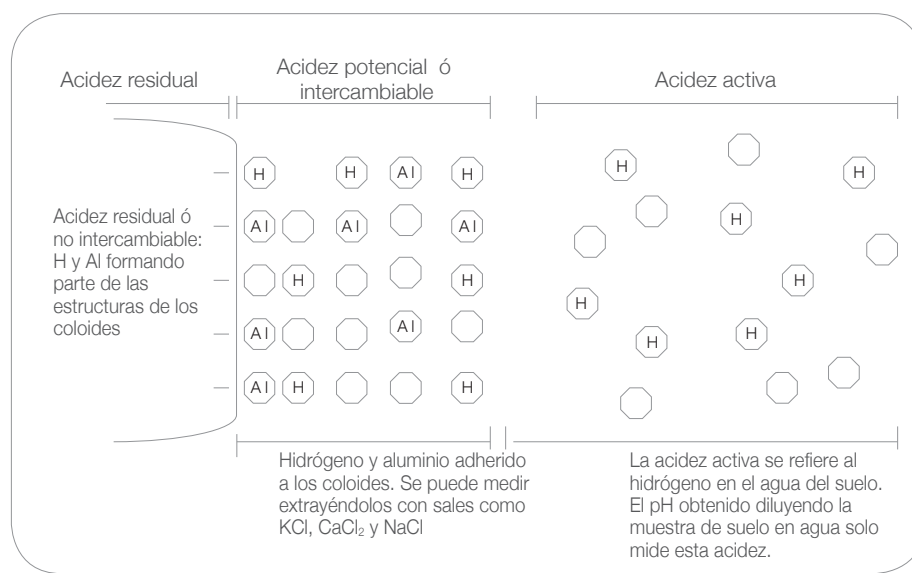


Figura 24. Los diferentes tipos de acidez del suelo.

6.2.2. Determinación del aluminio intercambiable

La muestra de suelo se satura con una solución que contiene cloruro de sodio (NaCl). El sodio desplaza y sustituye al hidrógeno (H⁺) y aluminio (Al⁺³) retenidos en los coloides del suelo (mediante intercambio catiónico). Este proceso deja ácido clorhídrico (HCl) y cloruro de aluminio (AlCl₃) en solución. Este último elemento continúa reaccionando con el agua en solución (hidrolización), convirtiéndose en hidróxido de aluminio (Al(OH)₃) y más HCl.



Mediante hidróxido de sodio y fenolftaleína (indicador) se determina la cantidad de aluminio en el extracto, obteniendo el contenido de aluminio intercambiable en el suelo.



6.2.3. Determinación del fósforo

Debido a que la mayor parte del fósforo en los suelos está retenido formando compuestos con otros elementos (fosfatos de aluminio, hierro, manganeso, zinc, calcio y magnesio) y en los coloides, su extracción se hace con reactivos que lo solubilizan. Esto puede incluir, reactivos que rompen el enlace de los fosfatos o que neutralizan en la solución del suelo el elemento que lo fija. El fósforo puede ser extraído por un gran número de soluciones; **con ácidos fuertes:** HCl, H₂SO₄, HNO₃; **ácidos débiles:** ácido cítrico, ácido láctico, ácido acético; **soluciones alcalinas** como el NaHCO₃ (Vargas *et al*, 1992). El uso de un extractante en particular depende de la condición y el tipo de suelo. En el cuadro 45 se presentan extractantes usados para la determinación de fósforo, de acuerdo con la condición del suelo.

Cuadro 45. Métodos de extracción de fósforo recomendados de acuerdo con la condición del suelo.

Condición del suelo	pH	Principal forma de fijación del fósforo	Extractantes más adecuados
Ácido	< 6	Fosfato de aluminio, fosfato de hierro, fosfato de manganeso	Bray 1, Mehlich 1, Mehlich 3
Levemente ácido a levemente alcalino	6 – 7.2	Fosfato de aluminio, fosfato de hierro, fosfato de manganeso, fosfato de calcio, fosfato de magnesio	Bray 1, Mehlich 1, Mehlich 3, Olsen
Alcalino, calcáreo	> 7.2	Fosfato de calcio, fosfato de magnesio	Olsen

Fuente: Elrashidi 2001.

Modo de acción de algunos de los extractantes de fósforo más usados

a) Olsen (NaHCO_3 , carbonato de sodio, a pH 8.5).

Desarrollado por Sterling R. Olsen en 1954 en Carolina del Norte, Estados Unidos (Elrashidi, 2001; Sims, 2000). Este extractante es más recomendado para suelos que van de neutros a alcalinos (pH de 7 en adelante, con predominancia de fosfatos de calcio), ya que el bicarbonato (HCO_3^-) del extractante se lía con el calcio contenido en la solución del suelo, formando carbonato de calcio. Esta reducción de calcio en la solución provoca que el calcio retenido como fosfato de calcio pase a la solución del suelo, liberando el fósforo. En suelos ácidos, con predominancia de fosfatos de aluminio, hierro y manganeso, el carbonato de sodio subestima la cantidad de fósforo presente (Donahue et al., 1981; Rodríguez, 2005). Esto significa que este reactivo no es el más adecuado para la extracción de fósforo en suelos de las zonas altas de Honduras, debido a la reacción ácida de sus suelos. De acuerdo con Sims (2000), 10 mg de fósforo/kg de suelo obtenidos con Olsen se consideran, generalmente, óptimos para los cultivos.

En Costa Rica, Vanegas (1992) reportó que este método presenta buen potencial de uso en suelos vertisoles de ese país, con predominancia de fosfatos de calcio. Contrario a la generalidad, Vázquez (2004) trabajando con suelos ácidos en Argentina encontró que la solución Olsen modificado (NaHCO_3) resultó como la más adecuada para análisis de rutina. Vanegas González *et al.* (1999) encontró que el método de extracción de fósforo que mejor correlacionó con el rendimiento de trigo en un suelo Andisol fue Olsen, determinando que el cultivar evaluado responderá a la aplicación de fósforo, si el nivel en suelo es menor que 8.4 mg/kg. En Chile se indica que el método Olsen ha sido el más satisfactorio para la extracción del fósforo en muchos suelos, ya que ha sido el que mejor se relaciona con los rendimientos de los cultivos en el campo, lo que, como lo dice el autor, podría deberse a que este método es mejor estimador del fósforo retenido en los coloides (Rojas, 1998). Dabin (1980) indica que la preferencia por este reactivo se debe a que correlaciona bien, tanto en suelos aireados como en los inundados, lo mismo que en suelos salinos.

b) **Bray I (Ácido clorhídrico [HCl] + Fluoruro de amonio [NH₄F]).**

Desarrollado por Roger Bray y Lester Kurtz en Illinois, USA, en 1945 (Elrashidi, 2001; Sims, 2000). En general se considera que este extractante trabaja mejor en suelos ácidos, ya que el hidrógeno del ácido clorhídrico (H⁺) y el flúor del fluoruro de amonio (F⁻²) son más efectivos para disolver los compuestos fosfóricos predominantes en estos suelos (fosfatos de aluminio, hierro y manganeso) (Sims, 2000). Además, la disminución del pH del método hasta 2.6 favorece la solubilidad de fósforo. Se cree que en suelos alcalinos, el flúor es rápidamente neutralizado por el calcio en solución, por lo que pierde efectividad (Rodríguez, 2012). No se recomienda el uso de este extractante en suelos con altos contenidos de calcio o carbonato de calcio, pH mayor a 6.8 y con media a alta saturación de bases o suelos que han recibido recientemente altas aplicaciones de cal o roca fosfórica, ya que, en este último caso, este reactivo removerá el fósforo de la roca fosfórica, sobrevalorando el contenido de fósforo en el suelo (Sims, 2000). En general se considera que un valor entre 25 mg y 30 mg de fósforo/kg de suelo es adecuado para los cultivos (Sims, 2000). Siendo que este reactivo es más eficiente en suelos ácidos, podría ser usado satisfactoriamente para determinación de fósforo en suelos de las zonas altas de Honduras.

En Costa Rica, Vargas (1992) indicó que Bray II (que es el mismo Bray I, solo que se le incrementó el ácido clorhídrico para mejorar su actividad en suelos alcalinos) presentó extracción satisfactoria de fósforo en un suelo vertisol con predominancia de fosfatos de calcio. García y Pantoja (1998) y García Galvis *et al.* (2006) indican que la solución Bray II, como extractante de fósforo, presenta buena correlación con la respuesta de cultivos en suelos ácidos de Colombia, recomendando, para el cultivo de papa, 400 kg/ha de P₂O₅ si el suelo presenta < 30 ppm de fósforo y entre 100 y 200 kg/ha de P₂O₅ si el suelo tiene 30-60 ppm de fósforo.

- c) **Mehlich 3 (CH₃COOH + NH₄NO₃ + NH₄F + EDTA, pH= 2.5).** Desarrollado por Adolf Mehlich en 1984 (Elrashidi, 2001). Antes, este mismo autor había desarrollado los extractantes Mehlich 1 y 2. Mehlich 3 es una modificación de los dos anteriores, con el fin de que sirva como extractante universal. Se considera que este reactivo puede usarse para extracción de fósforo tanto en suelos ácidos como en alcalinos (Sims, 2000). Si observamos su composición veremos que este extractante tiene fluoruro de amonio, igual que el Bray, lo que lo hace eficaz para extraer fósforo de suelos ácidos. Además, Mehlich 3 contiene ácido acético, que le ayuda a remover fósforo y puede trabajar en suelos alcalinos debido a que, como lo dice Sims (2000), su componente ácido es menos neutralizado, un problema que se presenta con Mehlich 1. De acuerdo con este mismo autor, en general, 45 mg a 50 mg de fósforo/kg de suelo obtenido con Mehlich 3 se considera óptimo para el crecimiento de las plantas cultivadas. Aunque, en Costa Rica, Cabalceta y Molina (2005) trabajando con varios tipos de suelo, reportan que Mehlich 3 presentó niveles críticos para fósforo muy por debajo de este rango (desde 3 mg hasta 16 mg de fósforo/kg de suelo). En Honduras,

Mehlich 3 es el reactivo usado por la Escuela Agrícola Panamericana (Zamorano), lo que resulta ideal para extracción de fósforo en los suelos ácidos de las zonas altas de Honduras.

d) **Morgan modificado (Hidróxido de amonio $[NH_4OH]$ + ácido acético $[CH_3COOH]$, pH 4.8).**

Esta solución fue presentada por McIntosh en 1969, partiendo de la solución Morgan original (acetato de sodio $[NaOAc]$ + ácido acético $[CH_3COOH]$) de M.F. Morgan, presentada en 1941 en la Universidad de Connecticut, Estados Unidos, y se considera ideal para extraer fósforo en suelos que van de ácidos a neutros. Esta solución es la utilizada por el Laboratorio de Suelos de la Fundación Hondureña de Investigación Agrícola y, debido a su mejor actividad en suelos ácidos, puede ser adecuada para determinar el contenido de fósforo en las zonas altas de Honduras. Una característica de esta solución es que extrae valores más bajos de fósforo, en comparación con el resto de extractantes de mayor uso, aunque esto no lo hace menos efectivo. Esto podría deberse a que este extractante está más correlacionado con el fósforo soluble de la solución del suelo (Dabin, 1980).

6.2.4. Determinación de potasio

El potasio en el suelo se encuentra en diferentes lugares (figura 25); el que está en la solución del suelo y adherido a los coloides es el más rápidamente disponible para las plantas. El potasio retenido entre capas de arcilla, más el que forma parte de la estructura de los minerales del suelo, son liberados lentamente, por lo que estarán disponibles para las plantas a largo plazo. Los métodos de extracción difieren de acuerdo con las fracciones de potasio que queremos conocer. Por ejemplo, Ramos *et al.* (2006), determinaron diferentes fracciones de potasio en suelos de Colombia de la siguiente forma: 1) potasio soluble (se encuentra en el agua del suelo), obtenido a partir de pasta de saturación; 2) potasio intercambiable (está en los coloides), extraído mediante acetato de amonio (NH_4OAc); 3) potasio interlamilar (situado entre capas de arcillas, no es disponible a corto plazo), extraído mediante ácido nítrico (HNO_3) en ebullición; 4) potasio total, por digestión húmeda en ácido fluorhídrico; 5) potasio estructural (no disponible para las plantas), por diferencia entre el total y las otras formas de potasio.

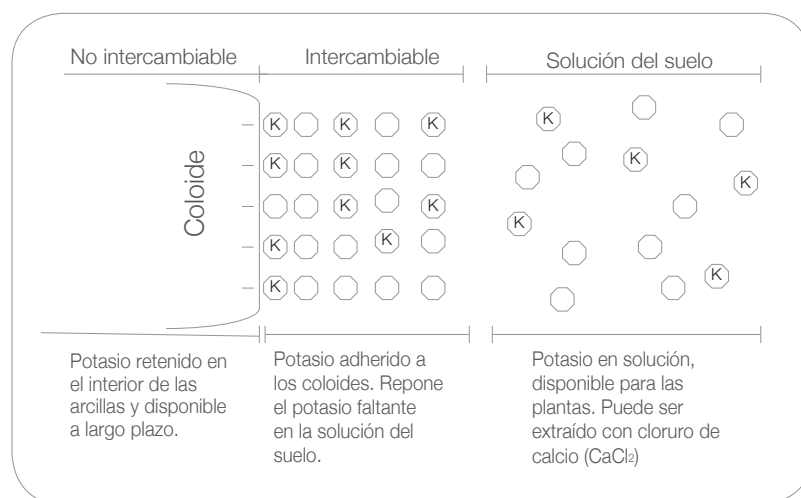


Figura 25. Diferentes ubicaciones del potasio en el suelo.

Sin embargo, la fracción de potasio de mayor interés es la que está fácilmente disponible, por lo que es el que se debe considerar en los planes de fertilización. Cuando las fertilizaciones potásicas se basan partiendo de métodos que miden solo la concentración del potasio en el agua del suelo, los resultados no han sido muy satisfactorios, siendo mejor cuando, además, se suma el potasio en los coloides (Fassbender, 1994). Los métodos que miden el potasio en los coloides usan soluciones que contienen cationes (catión índice) que, aplicados en gran cantidad a las muestras de suelo, desplazan el potasio desde los coloides por intercambio catiónico. El potasio desplazado va a la solución del suelo, desde donde es cuantificado, obteniéndose una medida del potasio adherido a los coloides, más el potasio en la solución del suelo.

Los laboratorios de análisis de suelos en Honduras, usan dos extractantes para determinar el contenido de potasio en los suelos, el acetato de amonio (Fundación Hondureña de Investigación Agrícola) y el Mehlich 3 (Escuela Agrícola Panamericana [Zamorano]).

La solución **Mehlich 3** es considerada un extractante universal, ya que es capaz de remover una gran cantidad de elementos del suelo. En general es usada para extraer fósforo, potasio, calcio, magnesio, sodio, cobre, zinc, manganeso, boro, aluminio y hierro (Ziadi y Sen Tran, 2006). Esto se debe a que está compuesta de varios reactivos (ácido acético, nitrato de amonio, fluoruro de amonio, ácido nítrico y EDTA). El fósforo es obtenido por la acción del ácido acético y el fluoruro; el potasio, calcio, magnesio y sodio intercambiable son desplazados desde los coloides a la solución por intercambio iónico con el amonio, mientras que el retenido en otros lugares es removido por el ácido nítrico. Los elementos menores son extraídos por la acción de intercambio del amonio y por quelatización con el EDTA. Una característica de Mehlich 3 y que la ha hecho atractiva para los laboratorios de muchos lugares del mundo, es que resulta en significativos bajos costos, ya que de una sola vez se determinan muchos elementos.

El **acetato de amonio** extrae el potasio adherido a los coloides por intercambio con el amonio (NH_4^+), y diversos estudios han encontrado que tanto el acetato de amonio, como Mehlich 3, remueven parecidas cantidades de potasio (Barbagelata, 2006), indicando que ambas

soluciones actúan sobre los mismos sitios, lo que no es extraño, si se considera que ambos extractantes presentan al amonio, como principal intercambiador.

6.2.5. Determinación del calcio y magnesio

Para la determinación del calcio y magnesio se utilizan sustancias como cloruro de amonio (NH_4Cl), acetato de amonio (NH_4OAc), cloruro de sodio (NaCl), cloruro de bario (BaCl_2), cloruro de potasio (KCl). Vargas *et al.* (1992) indican que los ácidos fuertes no son recomendados debido a que pueden disolver el calcio y el magnesio de lugares que, bajo condición natural del suelo, no estarían disponibles para las plantas, mientras que los ácidos débiles no extraen todo el contenido en los coloides. El mismo autor señala que el cloruro de potasio (KCl) ha dado buenos resultados como extractante de calcio y magnesio en Costa Rica.

En Honduras, los extractantes usados para la determinación de calcio y magnesio son el acetato de amonio (FHIA) y la solución Mehlich 3 (Zamorano).

6.2.6. Determinación de elementos menores

Para la extracción de micronutrientes se usan muchos reactivos, aunque los más usados son los agentes quelatantes. Los quelatantes son sustancias orgánicas que tienen gran afinidad por los micronutrientes metálicos, acomplejándose con ellos cuando se encuentran en solución. Los laboratorios de suelos la usan para determinar el contenido de hierro, manganeso, cobre y zinc en el suelo. Cuando la muestra de suelo es saturada con este tipo de soluciones, el agente quelatante "atrapa" los metales presentes en la solución del suelo, disminuyendo su concentración en la solución. Esto causa que los metales sean repuestos por los adheridos a los coloides, los que, a la vez, también son acomplejados por el quelato. La efectividad de los quelatos para determinación de elementos menores en suelos ha sido ampliamente probada; por ejemplo, Vallejo y López (1988) compararon la efectividad de dos soluciones extractoras para la determinación de hierro, manganeso, zinc y cobre, en suelos venezolanos. Ellos concluyeron que el ácido Dietilentriamina penta-acético (DTPA) fue más efectivo que el reactivo de Mehlich 2. En Colombia, Castaño *et al.* (1988), evaluaron métodos de extracción de zinc en suelos alcalinos del valle del Cauca. El orden de eficiencia fue: $\text{HCl } 0.1 \text{ N} > \text{EDTA } 0.05 \text{ M} > (\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$.

Los laboratorios de suelos en Honduras usan agentes quelatantes para determinar el contenido de hierro, manganeso, cobre y zinc en los suelos; el DTPA usado por la FHIA y el EDTA contenido en el extractante universal Mehlich 3 usado por El Zamorano.

Para la determinación del boro y azufre se usa fosfato de calcio [$\text{CaH}(\text{PO}_4)_2$], mientras que para el aluminio intercambiable se usa el KCl . Otro método de determinación de boro es mediante "agua caliente", muy utilizado alrededor del mundo y que también ha sido usado por el laboratorio de la FHIA.

6.3 Niveles de suficiencia del análisis del suelo

Para que los análisis de suelos sean de uso práctico, las cantidades de nutrientes obtenidas mediante los métodos de medición deben correlacionarse con la respuesta de los cultivos en el campo. No se encontró información que indique que estos estudios se hayan realizado en Honduras. Esto significaría que los niveles de suficiencia usados actualmente por los laboratorios de suelos en el país parten de estudios hechos en otros países, bajo condiciones y tipos de suelos parecidos a los de Honduras. En los cuadros 46 y 47 se presentan los extractantes y rangos de suficiencia usados por los laboratorios de suelos en Honduras. El Zamorano estima la suficiencia del potasio, calcio, magnesio y sodio partiendo del porcentaje de saturación de bases (proporción de cada uno que ocupa la CIC). En Costa Rica, Cabalceta y Molina (2006) hicieron una determinación de los niveles críticos de estos elementos, extraídos mediante Mehlich 3, para sorgo forrajero (*Sorghum bicolor*). Los resultados se presentan en el cuadro 48.

Cuadro 46. Métodos de extracción usados por el Laboratorio de Suelos de la Fundación Hondureña de Investigación Agrícola en 2011.

Elemento	Solución extractora	Rango medio
pH	Suelo: agua= 2:1	6 – 7
M.O.	Método de Walkley & Black	2 – 4 %
Nitrógeno	5 % de la materia orgánica	0.2 – 0.5 %
Fósforo	Acetato de amonio 1N pH 4.8	10 - 20 mg/kg
Potasio	Acetato de amonio 1N pH 4.8	250 - 350 mg/kg (0.64 - 0.90 cmol(+)/kg)
Calcio	Acetato de amonio 1N pH 4.8	1000 - 2000 mg/kg (5 - 9 cmol(+)/kg)
Magnesio	Acetato de amonio 1N pH 4.8	180 - 250 mg/kg (1.5 - 2 cmol(+)/kg)
Hierro	DTPA pH 7,3	5 - 15 mg/dm ³
Manganeso	DTPA pH 7,3	2 - 10 mg/dm ³
Cobre	DTPA pH 7,3	0.5 - 1.0 mg/dm ³
Zinc	DTPA pH 7,3	1 - 5 mg/dm ³
Azufre	CaH(PO ₄) ₂	20 - 80 mg/kg
Boro	CaH(PO ₄) ₂	0.5 - 8,0 mg/dm ³
Aluminio	KCl	< 1 cmoles/kg

Cuadro 47. Métodos de extracción usados por el Laboratorio de Suelos de la Escuela Agrícola Panamericana en 2011.

Elemento	Solución extractora	Rango medio
pH	Suelo : Agua= 1:1	6 - 7
M.O.	Método de Walkley & Black	2 - 4 %
Nitrógeno	5% de la materia orgánica	0.2 - 0.5%
Fósforo	Mehlich 3*	13 - 30 mg/kg
Potasio	Mehlich 3	Por saturación de bases (2 - 6 % de la CIC)**
Calcio	Mehlich 3	Por saturación de bases (60 - 80 % de la CIC)
Magnesio	Mehlich 3	Por saturación de bases (10 - 20 % de la CIC)
Sodio	Mehlich 3	Por saturación de bases (0 - 3 % de la CIC)
Hierro	Mehlich 3	56 - 112 mg/kg
Manganeso	Mehlich 3	28 - 112 mg/kg
Cobre	Mehlich 3	1.7 - 3.4 mg/kg
Zinc	Mehlich 3	1.7 - 3.4 mg/kg
Azufre	CaH(PO ₄) ₂	20 - 80 mg/kg
Boro	CaH(PO ₄) ₂	0.5 - 8.0
Aluminio	-	-

* **Mehlich 3**= CH₃COOH 0.2 M + NH₄NO₃ 0.25 M + NH₄F 0.015 M + EDTA 0,001 M. pH 2.5

** **Adicionado por el autor**

Cuadro 48. Niveles críticos de las bases intercambiables para sorgo forrajero (*Sorghum bicolor*) usando Mehlich 3 como extractante en diferentes tipos de suelos en Costa Rica.

	Potasio	Calcio	Magnesio
	Ultisoles		
Nivel crítico (cmoles(+)/kg suelo)*	0.20	4.0	0.80
	Inceptisoles		
Nivel crítico (cmoles(+)/kg suelo)	0.20	3.1	1.10
	Vertisoles		
Nivel crítico (cmoles(+)/kg suelo)	0.27	27.0	13.00
	Ultisoles		
Nivel crítico (cmoles(+)/kg suelo)	0.22	5.0	0.75
	General		
Nivel crítico (cmoles(+)/kg suelo)	0.17	5.0	0.70

***Nivel crítico** = límite entre deficiente y suficiente

Fuente: Cabalceta y Molina 2006.

Relación entre los extractantes acetato de amonio (FHIA) y Mehlich 3 (Zamorano)

No siempre es posible hacer relaciones entre diferentes extractantes. En el caso del fósforo, aunque se ha intentado, no ha sido posible encontrar una relación directa entre el obtenido por Mehlich 3 (usado por El Zamorano) y el acetato de amonio (usado por FHIA). Esto significa que no se puede estimar la extracción de fósforo por acetato de amonio a partir de lo extraído por Mehlich 3, o viceversa.

Al respecto, Ziadi y Sen Tran (2006) hacen una revisión bibliográfica del tema y encontraron algunas equivalencias entre el Mehlich 3 y el acetato de amonio y el DTPA (este último también usado por FHIA):

1. La cantidad de potasio y sodio extraída por Mehlich 3 es igual a la determinada mediante acetato de amonio.
2. La cantidad de calcio y magnesio extraída por Mehlich 3 es de alrededor de 1.1 veces más que la extraída por acetato de amonio.
3. La cantidad de zinc extraída por Mehlich 3 es entre el 50% y 75% de la extraída con DTPA
4. El Cu extraído con Mehlich 3 es 1.8 veces más que el extraído por DTPA

6.4 Toma de las muestras de suelo

Para que el resultado del análisis químico sea confiable, es necesario obtener debidamente las muestras. Algunos aspectos a tomar en cuenta se dan a continuación:

a) Delimitar las partes del terreno con claras diferencias, como:

- **Pendiente:** si hay áreas con marcadas diferencias de pendiente dentro del terreno, es mejor delimitarlas y enviar al laboratorio una muestra por cada área con diferente pendiente. Esto es necesario ya que en general los suelos en pendientes tienen menor contenido de nutrientes, debido a que estos son lavados por las lluvias. En los suelos cultivados, cuanto mayor es la pendiente, menor es el contenido de nutrientes y materia orgánica.
- **Color del suelo:** si grandes áreas muestran diferencias de color, deben delimitarse y mandar una muestra del suelo por cada área de diferente color. En general, un color negro puede ser indicio de un mayor contenido de materia orgánica, mientras que un suelo de color rojo, puede tener un mayor contenido de hierro. Debido a esto, es mejor manejarlos por separado.
- **Manejo:** si alguna o algunas zonas del terreno fueron recientemente enmendadas con cal y estiércol deberán delimitarse, ya que estas presentarán un mayor contenido nutricional que aquellas que no se enmendaron.
- **Vegetación:** si zonas significativamente grandes presentan diferencias en la vegetación, como por ejemplo, unas con montes de hoja ancha y otras con zacates o pastos, deben también delimitarse y enviarse al laboratorio una muestra por cada área con diferente vegetación. Es posible que la diferencia de vegetación se deba a toxicidades presentes en los suelos con zacates.
- **Áreas que de antemano han presentado un limitado crecimiento de las plantas:** si ya se determinó que el problema no es causado por encharcamiento, compactación o poca profundidad del suelo, es posible que se trate de alguna toxicidad o una deficiencia. En estos casos, es mejor enviar una muestra separada de estos suelos.

b) Toma de las muestras de suelo.

Materiales necesarios: balde plástico limpio, bolsas plásticas nuevas o muy limpias, pala limpia y lápiz y papel.

Una muestra de suelo es la representación de un terreno o una parte de él y del cual queremos conocer su contenido nutricional. Una muestra está compuesta de muchas submuestras. Por cada área delimitada se deberán tomar mínimo 20 submuestras. Si fuera posible tomar un mayor número de submuestras (30 o 40) es mejor. Cuantas más submuestras, más veraz será la información obtenida. La obtención de las submuestras debe hacerse de la siguiente manera (figura 26):

Primero: raspar con la pala o el azadón la superficie del suelo, a manera de dejar limpio de hojas, tallos, estiércol y terrones. Luego se deberá hundir la pala hasta 20 cm, sacando un bloque de suelo. De este bloque, se deberá obtener una porción de suelo de la parte de abajo (lo que se agarre con los cinco dedos). Esta es una submuestra y cada una deberá depositarse en el balde plástico. En el caso de especies con sistemas radiculares más profundos, como árboles frutales, se debe obtener dos muestras, una a 20 cm y otra a 60 cm.

Segundo: una vez obtenidas todas las submuestras, estas deberán mezclarse bien, al mismo tiempo que se deshacen los terrones. Una vez mezcladas, se tomará una porción, de máximo una libra, y se depositará en la bolsa plástica.

Tercero: con lápiz y papel, se anotará la información necesaria: nombre del técnico o agricultor, fecha, lugar, lote y el análisis requerido. En el laboratorio de la FHIA existe el análisis de rutina y que incluye: la materia orgánica, nitrógeno total, pH, contenido de fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, zinc y cobre. Para la determinación de otros elementos (aluminio, azufre, boro y sodio) hay que pedirlos por aparte y tiene un costo adicional.

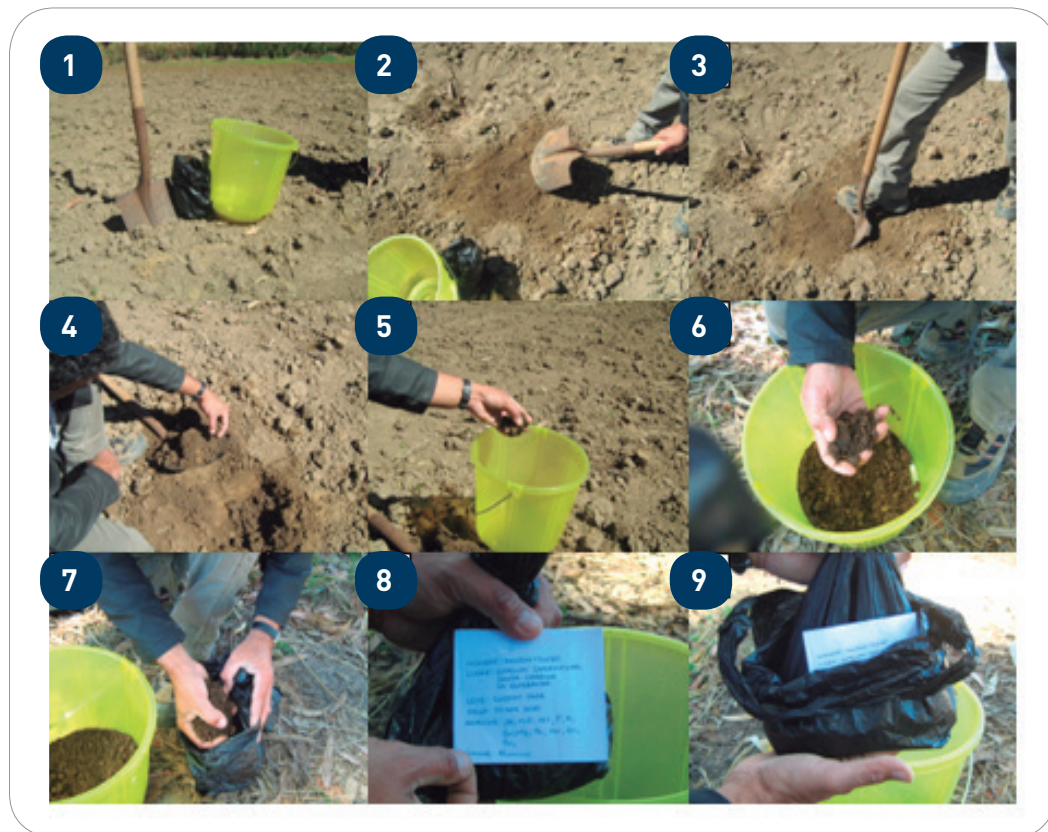


Figura 26. Materiales y procedimiento para la obtención de las submuestras de suelo para análisis químico.

6.5 Análisis foliar

Este análisis sirve para determinar el contenido de nutrientes en la sabia de las hojas. Se debe tomar como complemento del análisis de suelo y es de mucha ayuda, ya que nos puede dar luces sobre la proporción en que están siendo usados por las plantas los nutrientes suministrados mediante el fertilizante o por el suelo. De tal forma que, de ser necesario, podemos hacer correcciones a tiempo. El análisis de suelo, en conjunto con el análisis foliar, permite desarrollar planes de fertilización más eficientes.

En general, las muestras consisten de hojas. Estas deben ser tomadas en lugares y momentos específicos del desarrollo de los cultivos, aspectos estos ya estandarizados, para que los resultados puedan ser comparados con rangos de suficiencia. En el cuadro 49 se da información sobre los puntos en las plantas de donde se deben obtener las submuestras y el período de desarrollo **óptimo** para algunos cultivos. Lo mejor es solicitar esta información al laboratorio donde serán enviadas las muestras. Si se envían muestras obtenidas en lugares y momentos diferentes a los que recomienda el laboratorio, los resultados no podrán ser comparados con los rangos de suficiencia. Esto es así debido a que el contenido de nutrientes entre diferentes períodos de crecimiento de las plantas **varía**, al igual que de una hoja nueva a una vieja, o entre una hoja ubicada arriba o en medio o abajo. En el cuadro 50 se presentan rangos de suficiencia de nutrientes en tejido para algunos cultivos.

Para la obtención de las submuestras, se debe recorrer el campo en zigzag, eligiendo las plantas al azar. Las hojas obtenidas deben irse poniendo en un recipiente plástico y limpio. Al final, las submuestras deben colocarse en bolsas de papel. Nunca se deben usar bolsas de polietileno (plásticas), ya que encierran la humedad, lo que podría provocar el desarrollo de patógenos en la muestra durante el transporte.

Al momento de tomar las muestras, es importante tener el cuidado de no tomar hojas de plantas con daños severos por insectos o enfermedades. Tampoco se deben considerar plantas que han sido recientemente asperjadas con pesticidas o abonos foliares. En estos casos, es mejor tomar las muestras una semana después de la aplicación. Si el objetivo del análisis foliar es determinar la causa de cierta decoloración en las hojas, lo mejor es enviar dos muestras, una con hojas que tengan el problema y otra con hojas normales. De esta forma, se podrá hacer la comparación.

La muestra debe ir acompañada de toda la información posible: nombre del agricultor, lugar, fecha de recolección de la muestra, cultivo, período vegetativo del cultivo al momento de tomar la muestra (crecimiento, floración, vivero), cantidad y tipo de fertilizantes aplicados al suelo y al follaje, cantidad y tipo de enmienda aplicada (cal o materia orgánica), pesticidas aplicados recientemente, si la plantación está bajo riego o no. Esta información servirá para que el técnico del laboratorio pueda hacer un mejor análisis de los resultados y así poder hacer una buena recomendación.

Cuadro 49. Obtención de muestras para análisis foliar en algunos cultivos.

Cultivo	Momento para la toma de la muestra	Parte de la planta	Nº de hojas
Apio	A mitad de crecimiento, a 12 o 15 pulgadas de altura	Pecíolos de las hojas maduras más jóvenes	15 – 30
Maíz	1) Antes de espigar	Toda la hoja desarrollada abajo del verticilo	15 – 25
	2) Al momento del brote de cabellera	Toda la hoja en el nudo de la mazorca	15 – 25
Papa	Antes o durante la primera floración	Tercera a sexta hoja de la yema principal	20 – 30
Arroz	Plántula con menos de 12 pulgadas de altura	Toda la parte aérea	50 - 100
Sorgo	Antes o al momento de espigar	Segunda hoja desde la parte superior	15 – 25
Soya	Antes o durante la floración	Hojas totalmente desarrolladas en la parte superior de la planta	20 – 30
Fresa	Mitad de crecimiento	Pecíolos de las hojas maduras jóvenes	50 – 75
Remolacha	Mitad de crecimiento	Hojas centrales o pecíolos	30 – 40
Caña de Azúcar	Hasta la edad de 4 meses	Hojas superiores totalmente desarrolladas	15 – 25
Banano	6 a 8 meses de edad	Tercera hoja totalmente expandida	1
Café	Seis semanas después de la floración y antes del endurecimiento de los frutos	Tercero o cuarto par de hojas	30 – 50
Manzano	8 a 12 semanas después de la floración completa; o 2 a 4 semanas después de la formación de terminales en árboles productores	Hojas del medio del terminal en crecimiento	30 – 50
Durazno	Igual al manzano	Hojas del medio del retoño	30 – 50

Fuente: Donahue *et al.* 1981.

Cuadro 50. Niveles normales de nutrientes en el tejido de algunos cultivos.

Nutriente	Maíz Hoja de la mazorca al iniciar la cabellera	Papa Pecíolos de hojas recién maduras, a mitad del crecimiento del cultivo	Soya Hoja totalmente desarrollada antes de la floración inicial	Remolacha Hojas superiores desarrolladas	Hortalizas Hojas superiores desarrolladas
Nitrógeno %	2.76 – 3.50	2.50 – 4.0	4.25 – 5.50	3.01 – 4.50	2.50 – 4.0
Fósforo %	0.25 – 0.40	0.18 – 0.22	0.26 – 0.50	0.26 – 0.50	0.25 – 0.80
Potasio %	1.71 – 2.50	6.0 – 9.0	1.71 – 2.50	2.01 – 6.0	2.0 – 9.0
Calcio %	0.21 – 1.0	0.36 – 0.50	0.36 – 2.0	0.36 – 1.20	0.35 – 2.0
Magnesio %	0.16 – 0.60	0.17 – 0.22	0.26 – 1.0	0.36 – 1.0	0.25 – 1.0
Manganeso ppm	20 - 150	30 - 200	21 - 100	21 - 150	30 - 200
Hierro ppm	21 - 250	30 - ¿?	51 - 350	51 - 200	50 - 250
Boro ppm	4 - 25	15 - 40	21 - 55	26 - 80	30 - 60
Cobre ppm	6 - 20	7 - 30	10 - 30	11 - 40	8 - 20
Zinc ppm	20 - 70	30 - 100	21 - 50	19 - 60	30 - 100
Molibdeno ppm	0.1 - 2.0	0.5 - 4.0	1.0 - 5.0	0.15 - 5.0	0.5 - 5.0

Fuente: Donahue *et al.* 1981.

7. APLICACIÓN FOLIAR DE LOS NUTRIENTES

La aplicación de nutrientes a las plantas a través de las hojas es una práctica común alrededor del mundo y aunque la forma natural de absorción de nutrientes por las plantas es a través de las raíces, muchos trabajos de investigación dejan claro que, bajo ciertas circunstancias, la fertilización foliar puede ser muy efectiva. La fertilización foliar consiste en la aplicación de nutrientes disueltos en agua y asperjados al follaje de las plantas. Esto es posible debido a que las plantas tienen la capacidad de absorber nutrientes a través de sus hojas (Romheld y El-Fouly, 1999; Trinidad y Aguilar, 1999; Rodríguez *et al* s. f.). La absorción se produce por las aberturas naturales de las hojas, poros de la cutícula y estomas y a través de la epidermis. Todos los nutrientes esenciales han sido aplicados a las plantas a través de las hojas, aunque algunos con relativo éxito, debido a que ciertos nutrientes no se traslocan (forman parte de la planta) lo suficientemente rápido.

7.1 Cuándo se deben hacer fertilizaciones foliares

- a) En períodos de mayor crecimiento de los cultivos, lo que va desde la siembra hasta inicios de la floración, ya que en este período las plantas (especialmente de híbridos y variedades modernas de alta productividad) demandan una mayor cantidad de nutrientes desde el suelo. Bajo esta situación, los nutrientes no pueden ser dispuestos desde los coloides al agua del suelo (desde donde son absorbidos por las raíces de las plantas) a la misma velocidad que la requerida. Aplicaciones foliares de los nutrientes de mayor demanda por las plantas, nitrógeno, fósforo y potasio durante el período de mayor crecimiento, ayudarán a evitar deficiencias en las plantas.
- b) Cuando los suelos no pueden proveer nutrientes debido a deficiencias naturales o condiciones de pH extremas (muy ácidos o muy alcalinos) o situaciones de encharcamiento del agua por excesos de lluvias. En la zona alta de Intibucá, con suelos excesivamente ácidos y altos en aluminio y manganeso, seguramente se presentarán deficiencias de nitrógeno, fósforo, calcio, magnesio y molibdeno en los suelos, si esta condición no es corregida antes de ser sembrados. Bajo esta situación, aplicaciones foliares de estos nutrientes durante todo el ciclo de los cultivos, será de mucha ayuda para las plantas.

7.2 Factores que influirán en el éxito de la aplicación foliar de nutrientes

- a) Es mejor que el pH del agua a usar para hacer la solución-fertilizante, tienda a la acidez. En general se acepta que pH entre 4.5 y 5.5 son adecuados; aunque en el caso de fósforo parece ser que la absorción es mayor a un pH de 3.0, como se puede observar en el cuadro 51.

Debido a lo anterior, será necesario acidificar el agua cuando su pH está por arriba de 5.5 o cuando se usan aguas altas en calcio, magnesio y carbonatos. Sustancias acidificantes y medidores del pH del agua, son vendidos en el comercio.

- b) Si las gotas de la solución-fertilizante son muy grandes al ser aplicada al follaje, estas quedarán retenidas entre los pelos (tricomas) que recubren las hojas (que aunque no se ven, ahí están), lo que no permitirá que la solución haga contacto con la superficie de las hojas. Lo ideal es que las gotas sean lo más pequeñas posibles para que pasen entre los tricomas. Esto se consigue aumentando la presión de salida del producto, desde la bomba de aplicación.

Cuadro 51. Efecto del pH e ión acompañante sobre la cantidad de fósforo absorbido por hojas (en microgramos) seis horas después de la aplicación.

Ión acompañante	pH					
	2	3	4	5	6	7
Potasio (K ⁺)	1.47	0.96	0.16	0.11	0.11	0.08
Sodio (Na ⁺)	2.03	2.97	1.31	1.59	1.21	0.75
Amonio (NH ⁴)	3.70	3.94	2.59	2.44	0.33	0.26

Fuente: Trinidad y Aguilar, 1999.

- c) Es necesario adicionar siempre a la solución-fertilizante un adherente, para conseguir un mejor contacto del producto con la superficie de las hojas.
- d) Se deberá evitar hacer las aplicaciones en horas de mayor sequedad (10 am a 3 pm) ya que la solución se secará rápido en las hojas, reduciéndose significativamente la absorción. Es mejor aplicar temprano en la madrugada (de 5 a 6 de la mañana) o en la tarde-noche (4 de la tarde en adelante), ya que durante este tiempo la humedad del ambiente es alta (mayor que 70 %), la temperatura se reduce (óptima absorción entre 19 y 21 °C), lo mismo que la velocidad del viento. Las hojas igual absorben nutrientes por las hojas de día como de noche. En el cuadro 52 se presenta la absorción de fósforo en hojas, a diferentes temperaturas del ambiente.

Cuadro 52. Efecto de la temperatura del ambiente sobre la absorción de fósforo en hojas de frijol.

Horas después de la aplicación	Absorción de fósforo en microgramos/100 gr		
	14 °C	21 °C	25 °C
3	0.015	0.307	0.243
6	0.433	1.040	0.560
12	1.230	1.675	0.738

Fuente: Trinidad y Aguilar, 1999.

- e) Hay que considerar el tiempo que tardan en absorberse los nutrientes a aplicar. La urea, el potasio y el magnesio se absorben en solo horas (cuadro 53), mientras que el fósforo puede tardar entre 5 y 10 días. Esto significa que si se aplica fósforo y ocurre una fuerte lluvia en los siguientes días, mucho del fósforo no logrará penetrar a la planta debido a su lentitud, y será necesaria una nueva aplicación.

Cuadro 53. Tiempo de absorción de nutrientes en los tejidos de la hoja.

Tiempo para que se absorba el 50 % de la solución	
Urea	½ - 2 horas
Fósforo	5 - 10 días
Potasio	10 - 24 horas
Calcio	1 - 2 días
Magnesio	2 - 5 horas
Zinc	1 - 2 días
Manganeso	1 - 2 días

Fuente: Romheld y El-Fouly, 1999.

- f) De preferencia hay que aplicar los nutrientes en forma quelatada, ya que los quelatos evitan que los nutrientes sean retenidos durante el proceso de ingreso al interior de las hojas, por aspectos de pH o intercambio iónico o por acomplejamiento con otros nutrientes. También es preferible aplicar los nutrientes acompañados de aminoácidos, ya que esto ayuda al ingreso del nutriente al interior de las hojas, lo mismo que acompañados de ácidos húmicos (Shaaban *et al.*, 2009).
- g) En el caso de los nutrientes que son de baja movilidad o inmóviles dentro de la planta, es necesario hacer una cobertura total del área foliar con la solución fertilizante. Por ejemplo, en el caso del hierro, un elemento casi inmóvil dentro de la planta, si se aplica el fertilizante foliar a solo la mitad de las hojas de la planta, el amarillamiento, típico de su deficiencia, solo desaparecerá en las hojas a las que les cae la solución fertilizante. En frijol se determinó la movilidad de los nutrientes aplicados a través de la aspersión foliar (cuadro 54).

Los quelatos consisten en nutrientes metálicos unidos a moléculas orgánicas (Valagro, 2004). Diversos estudios indican que de esta forma los nutrientes son más aprovechados por las plantas, ya que se evita que los nutrientes sean transformados a formas no absorbibles por las plantas (fijados), ya sea en el suelo o en el follaje. Hay varios tipos de moléculas quelatantes: 1) para facilitar la absorción radicular, EDDHA y EDDHSA, usados para quelatar el hierro, dada su alta afinidad con este elemento. 2) Para aplicación foliar y fertigación, EDTA, HEDTA, DTPA, LSA.

Cuadro 54. Movilidad de los nutrientes aplicados de forma foliar en plantas de frijol.

Móviles	Parcialmente móviles	Inmóviles
Potasio Fósforo	Zinc	Boro
Cloro Nitrógeno	Cobre Manganese Molibdeno Magnesio	Calcio
		Azufre
		Hierro

Fuente: Donahue *et al.* 1981.

- h) Otros aspectos a considerar son *i)* las hojas jóvenes, con cutículas más delgadas, absorben mejor los nutrientes que las hojas viejas; *ii)* las moléculas o nutrientes más pequeños se absorben más rápido. En este sentido, la urea se absorberá más rápido que los nutrientes quelatados; *iii)* los nutrientes con menor carga eléctrica tienden a absorberse mejor, por lo que el ion monovalente potasio (K^+) se absorberá más rápido que el divalente calcio (Ca^{++}) y moléculas como el fosfato di ácido ($H_2PO_4^-$) se absorberá mejor que el fosfato monoácido (HPO_4^{+2}); *iv)* Moléculas sin carga eléctrica se absorben mejor. En este caso, se absorberá mejor el ácido bórico (H_3BO_4) que el borato ($B(OH)_4^-$).

7.3 Dosis de aplicación foliar de los nutrientes

En el comercio hay una extensa gama de fertilizantes foliares, los que incluyen desde uno, dos o todos los nutrientes esenciales para las plantas. Sin embargo, en lo siguiente se tratarán los nutrientes aplicados foliarmente a las plantas usando, más que todo, los fertilizantes hechos para aplicación al suelo.

El nitrógeno: de los fertilizantes nitrogenados (urea, nitrato de sodio, sulfato de amonio y nitrato de potasio), la urea (46 % de nitrógeno) ha sido el más efectivo. En árboles frutales se usan hasta 600 g urea por 100 l de agua aplicado al follaje, y en hortalizas y fresa se recomienda 500 g/100 l de agua. Para que la urea pueda ser aplicada al follaje, su contenido de Biuret debe ser menor al 1%. Si se desconoce, lo mejor es hacer una prueba con algunas plantas, antes de aplicarlo a todo el cultivo. En el caso de nitrato de potasio se recomienda 1g – 2 g/l de agua y en el caso del nitrato de calcio, de 2 g – 3 g/l de agua.

El fósforo: este elemento, aplicado al follaje, es utilizado casi totalmente por las plantas. Mosali *et al.* (2006), reportaron que aplicaciones de fósforo al follaje de plantas de tomate rindieron 12% más que las plantas a las que se les aplicó la misma cantidad de fósforo al suelo. Sin embargo, no se recomienda sustituir la fertilización al suelo mediante aplicaciones al follaje, ya que en general no es posible dar cantidades grandes de fertilizantes a las plantas a través de las hojas. Kaya *et al.* (2001), lograron efectos positivos al aplicar fósforo y potasio, mediante el fosfato de potasio (KH_2PO_4), en tomate crecido en sustrato con fuerte salinidad. Mosali *et al.* (2004) reportaron que plantas de trigo respondieron a la aplicación foliar de fósforo, solo cuando las plantas crecieron en suelos deficientes de este nutriente.

En el caso de los suelos de la zona alta de Intibucá, altos fijadores de fósforo, las aplicaciones al follaje podrían ayudar a completar las necesidades de este nutriente en las plantas. Fertilizantes foliares con diferentes contenidos de fósforo son vendidos en el mercado. También, pueden hacerse aplicaciones foliares de fosfato monoamónico (MAP: 11% amonio y 52% fósforo en forma de P_2O_5) en dosis de 0.5 kg/100 l de agua para hortalizas y de 1 kg/100 l para árboles frutales, lo cual resulta idóneo, ya que el fósforo se absorbe más en las hojas cuando es acompañado de amonio. También puede servir como fuente de fósforo el fertilizante fosfato monopotásico (52% fósforo en forma de P_2O_5 y 34% potasio en forma de K_2O) aplicado al follaje en una concentración del 1% (1 kg/100 l agua). Los fertilizantes fosfóricos no deben mezclarse con calcio ni magnesio.

El potasio: además de la gama de productos potásicos para aplicación foliar encontrados en el mercado, se pueden usar tanto el nitrato de potasio, como el sulfato de potasio en dosis de 1g a 2 g/l de agua. En un vivero de café cv “bourbon”, aplicaciones al follaje de potasio en forma de KCl hasta una concentración del 3% y sulfato de potasio en concentración del 1%, resultaron efectivos para promover el desarrollo foliar de las plantas (Morillo, 1980).

Concentraciones mayores provocaron quemaduras en las hojas. En general, se considera al nitrato de potasio como la mejor fuente para aplicación foliar, ya que ambos elementos, nitrato y potasio, presentan sinergismo dentro de la planta.

El magnesio: este nutriente se puede aplicar al follaje de las plantas en forma de sulfato de magnesio a una concentración del 2 %. El sulfato de magnesio ha mejorado la producción de tomate, naranjo y manzana, cuando estos cultivos se han sembrado en suelos deficientes en magnesio. En Intibucá, casi la totalidad de los suelos presentan deficiencias de este nutriente (cuadro 55), por lo que aplicaciones foliares pueden ayudar a las plantas a mejorar las producciones.

El calcio: en general, este nutriente es mejor aplicarlo al suelo mediante el encalado, ya que las necesidades de calcio por las plantas son muy altas y difícilmente se pueden proveer solo por aplicación foliar. Cuando este nutriente se aplica al follaje, solo como complemento a la aplicación al suelo, se puede usar como fuente el cloruro de calcio (CaCl₂) en concentraciones de entre 2% y 4% o el nitrato de calcio en dosis de 2g a 3 g/l de agua. En la zona alta de Intibucá, este nutriente, en general, se presenta deficiente en los suelos (cuadro 55).

Cuadro 55. Contenido de calcio y magnesio en suelos de la zona alta de Intibucá, Honduras.

Lugar	Ca* (ppm)	Mg (ppm)
Sta. Catarina	520 B**	76 B
Sta. Catarina	890 B	142 B
Sta. Catarina	1010 B	56 B
Sta. Catarina	520 B	76 B
Sta. Catarina	610 B	100 B
Santa Catarina	860 B	166 B
Santa Catarina	220 B	60 B
Lajas	1020 B	213 N
Lajas	215 B	73 B
Pueblo Viejo	470 B	79 B
Pinares	760 B	84 B
Chogola	1400 B	157 B
El Tabor	530 B	100 B
El Pelón	240 B	59 B
Los Encinos	840 B	126 B
Los Encinos	230 B	90 B

** B: bajo; N: normal

Contenido normal: calcio (Ca): 2000 – 6000 ppm (acetato de amonio 1 N a pH 4.8) magnesio (Mg): 180 – 250 ppm (acetato de amonio 1 N a pH 4.8).

Fuente: FHIA.

El hierro: su deficiencia causa el amarillamiento intervenal de las hojas jóvenes, defoliación, pobre desarrollo de yemas, baja floración y pobre desarrollo de frutos. Este nutriente se presenta alto en los suelos de la zona alta de Intibucá (cuadro 56), por lo que no hay necesidad de hacer aplicaciones al follaje. Las deficiencias de hierro son comunes en suelos con pH de 7.0 para arriba. Cuando hay deficiencias de este nutriente se debe aplicar sulfato de hierro en dosis de 100 a 400 g/100 l de agua o, preferentemente, hierro quelatado en dosis de 100 a 200 gr/lt. Debido a que el hierro en las plantas es traslocado muy lentamente, es necesario que las aplicaciones lleguen a todas las hojas para obtener mejor resultado. Las hojas a las que no les caiga la solución fertilizante, se mantendrán amarillentas.

El manganeso: su deficiencia causa amarillamiento intervenal en hojas jóvenes y viejas (cuadro 56). En la zona alta de Intibucá, la mayoría de los suelos tienen excesos de este nutriente a tal grado que más bien intoxica las plantas. Sin embargo, algunos suelos orgánicos, denominados “polvosos” o “limosos” (suelos con 18% o 20 % de materia orgánica), presentan deficiencias de manganeso y son necesarias aplicaciones foliares a los cultivos. En general y en cultivos que crecen en suelos bajos en este nutriente, se recomiendan aplicaciones foliares de sulfato de manganeso, en dosis de 100 g a 300 g/100 l de agua.

El zinc: su deficiencia causa arrocetamiento, pobre desarrollo y caída de los frutos, amarillamiento intervenal y achaparramiento. El contenido de zinc en los suelos de la zona alta de Intibucá es variable, por lo que habrá suelos que presenten bajas concentraciones de este elemento. En estos casos, se puede aplicar al follaje sulfato de zinc en dosis de 100 – 200 g/100 l de agua.

El boro: este nutriente es poco móvil en la planta y su deficiencia causa aborto de flores, arrocetamiento, agrietamiento de los frutos. El contenido de boro en suelos del altiplano de Intibucá es un tanto desconocido, por lo que es necesario determinar su concentración en suelo mediante el análisis químico de suelo. Si hay deficiencia, se puede aplicar al follaje ácido bórico (Bórax) o borato de sodio u octoborato de sodio, en una concentración de 50 g – 150 g/100 l de agua.

El cobre: su deficiencia causa amarillamiento y enrollamiento foliar. No se presenta deficiente en los suelos de la zona alta de Intibucá. En casos de deficiencia, pueden hacerse aplicaciones al follaje usando 8 lb de sulfato de cobre + 8 lb de hidróxido de calcio (cal apagada) en 100 gal de agua. La cal apagada es para evitar que el cobre “queme” las hojas.

Cuadro 56. pH y contenido de elementos menores en algunos suelos de la zona alta de Intibucá. Honduras.

Lugar	pH	Hierro (ppm)	Manganeso (ppm)	Cobre (ppm)	Zinc (ppm)	Boro (ppm)
Pinares	5.4	2.4 N	54.0 A	0.40 B	0.44 B	-
Sta. Anita	6.2	26.0 A	62.0 A	0.64 N	3.00 N	-
Sta. Anita	5.4	25.0 N	46.0 A	0.58 N	0.74 B	-
Sta. Anita	5.2	19.0 N	41.0 A	0.66 N	0.74 B	-
Chogola	5.2	20.0 N	51.0 A	0.76 N	8.20 A	-
San José	5.6	7.2 N	43.0 A	0.38 B	2.20 N	-
Azacualpa	5.2	62.0 A	26.0 A	0.54 N	5.20 N	-
Sta. Catarina	5.6	19.2 N	68.6 A	0.66 N	0.46 B	-
Sta. Catarina	6.3	13.0 N	32.0 A	1.34 N	0.20 B	-
Sta. Catarina	5.4	17.4 N	25.2 A	2.52 N	1.60 N	0.80 N
Sta. Catarina	5.4	16.0 N	46.0 A	0.70 N	0.50 B	-
Sta. Catarina	5.0	9.7 N	22.4 A	0.42 B	0.24 B	-
El Tabor	4.8	10.9 N	52.5 A	1.92 N	1.12 N	0.68 N
El Pelón	4.6	18.6 N	1.30 B	0.24 B	0.26 B	0.96 N

*A= alto N= normal B= bajo

Rango normal: hierro= 5-15; manganeso= 2-10; cobre= 0.5-1; zinc= 1-5; boro= 0.5-8

Fuente: FHIA.

El molibdeno: Su deficiencia causa clorosis de las hojas más viejas y menor desarrollo de las hojas jóvenes. Se desconoce el contenido de este nutriente en los suelos de la zona alta de Intibucá. Sin embargo, es posible que esté deficiente, ya que la solubilidad del molibdeno se reduce mucho en suelos con alta acidez, como los suelos de Intibucá. Este nutriente, al igual que el hierro, debe ser aplicado en todas las hojas, porque es poco móvil. Cuando hay deficiencia, se puede aplicar 10 g/100 l de molibdato de amonio o molibdato de sodio.

Cuadro 57. Síntomas de deficiencia nutricional en cultivos.

Lugar de la planta	Síntoma principal	Nutriente
Hojas viejas	Clorosis	Uniforme N, S
	Necrosis	Intervenal Mg, Mn
		Márgenes y puntas K
Hojas jóvenes	Clorosis	Intervenal Mg, Mn
		Uniforme S
	Necrosis (o clorosis)	Intervenal Fe, Zn, Mn
		Deformación Ca, B, Cu
		Ca, Mo, Zn, B

Fuente: Valagro, 2004.

BIBLIOGRAFÍA

- Alam, M. 1999. Phosphate adsorption in soils and its availability to plants. Dera Ismail Khan, Pakistán, Facultad de Agricultura, Universidad de Gomal.
- Arroyo, N. 2009. Enmiendas orgánicas. Costa Rica. Disponible en www.enmiendasorganicas.blogspot.com/.
- ASA (American Society of Agronomy); CSSA (Crop Science Society of America); SSA (Soil Society of America). 1984. Nitrogen in crop production. Madison, Wisconsin, Estados Unidos de América.
- Asad, A.; Blamey, F.; Edwards, D. 2003. Effects of boron foliar applications on vegetative and reproductive growth of sunflower. *Annals of Botany* 92(4):565-570.
- Ashley, J. 2003. Stymieing soil erosion on hillsides in Honduras: a new rural agenda. s. l., ASPI.
- Barbagelata, P.A. 2006. Evaluation of potassium soil tests and methods for mapping soil fertility properties in Iowa corn and soybean field. Tesis Doctoral. Ames, Iowa, Estados Unidos de América, Iowa State University.
- Barber, S.F. 1995. Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach. 2 ed. Nueva York, Estados Unidos de América, John Wiley and Sons.
- Barrera, L. 1998. Los microelementos en el cultivo de la papa, con énfasis en Cundinamarca y Boyacá. *In* Guerrero, R. Fertilización de cultivos en clima frío. Bogotá, Colombia, Monómeros Colombo Venezolanos.
- Ben, M.; Loumi, O.; Crhab, M.; Latiri, K.; Hellali, R. 2004. Foliar potassium application on olive tree. *In* IPI Regional Workshop on Potassium and Fertigation Development in West Asia and North Africa (Rabat, Marruecos).
- Besoain, E. 1985. Mineralogía de arcillas de suelos. San José, Costa Rica, IICA.
- Bloom, A.J.; Sukrapanna, S.S; Warner, R.L. 1992. Root respiration associated with ammonium and nitrate absorption and assimilation by barley. *Plant Physiology* 99(4):1294-1301.
- Bossi, J; Ortiz, A; Caggiano, R; Olveira, C. 2011. Manual didáctico de geología para estudiantes de agronomía. Montevideo, Uruguay, Universidad de la República.
- Brito, D.T.; Kronzucker, H.J. 2008. Cellular mechanisms of potassium transport in plants. *Physiologia Plantarum* 133(4):637-650.
- Brunetto, G.; Kaminski, J.; Bastos de Melo, G.; Gatiboni, L.; Urquiaga, S. 2005. Uptake and redistribution of nitrogen in foliar application in young grapevines. *Revista Brasileira de Fruticultura* 27(1).
- Bugarin, R.; Galvis, A.; Hernández, T.; García, D. 2007. Capacidad amortiguadora y cinética de liberación del potasio en suelos. *Agricultura Técnica en México* 33(1).
- Camberato, J. 2001. Nitrogen in soil and fertilizers. South Carolina Turfgrass Foundation News 8(1):6-10.

- Campanilla, R; Sadzawaka, A. 2005. La acidificación de los suelos: origen y mecanismos involucrados. Santiago, Chile, INIA.
- Casanova, E. 2005. Introducción a las ciencias del suelo. Caracas, Venezuela, Universidad Central de Venezuela.
- Castaño, F; Castillo, LE; García, A. 1990. Evaluación de algunos métodos para la extracción de zinc disponible en suelos alcalinos del valle del Cauca. *Acta Agronómica* 40(3-4):117-135.
- Castro, H. 1998. Producción y fertilización de hortalizas en Colombia. *In* Guerrero, R. Fertilización de cultivos en clima frío. Bogotá, Colombia, Monómeros Colombo Venezolanos.
- Covarrubias-Ramírez, J.M. 2005. Absorción y eficiencia de uso de fósforo en papa cultivar Alpha con P32. *Agrociencia* 39:127-136.
- Coraspe, H.; Muraoka, T.; Francini, V.; Contreras, F.; Ocheuze, T. 2009. Absorción de formas de nitrógeno amoniacal o nítrica por plantas de papa en la producción de tubérculo-semilla. *Agronomía Tropical* 59(1):45-58.
- Cruzate, G.; Rivero, E.; Turati, R. 2006. Cobre, hierro y manganeso: mapas de disponibilidad y respuesta a la fertilización en suelos de la región pampeana. *In* Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo [20, Salta, Jujuy, Argentina]. Actas.
- Dabin, B. 1980. Phosphorus deficiency in tropical soils as constraint on agricultural output. *In* IRRI (International Rice Research Institute, Filipinas); New York State College of Agricultura and Life Sciences, Cornell University, Estados Unidos. Priorities for alleviating soil-related constraints to food production in the tropics. Los Baños, Laguna, Filipinas. p. 217-232.
- Domenech, X; Peral, J. 2006. Química ambiental de sistemas terrestres. Barcelona, España, Editorial Reverte.
- Donahue, R.L.; Miller, R.W.; Shickluna, J.C. 1981. Introducción a los suelos y al crecimiento de las plantas. Ciudad de México, México, Prentice Hall Hispanoamericana.
- Dontsova, D.E.; Norton, D. 1999. Effects of exchangeable Ca:Mg ratio in soil clay flocculation, infiltration and erosion. *In* Stott, D.E.; Mohtar, R.H.; Steinhardt, G.C. Sustaining the global farm. 10th International Soil Conservation Organization Meeting. Purdue University y USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory.
- Ebrahin, M.; Aly, M. 2004. Physiological response of wheat to foliar application of zinc and inoculation with some bacterial fertilizer. *Journal of Plant Nutrition* 27(10):1859-1874.
- Ekelof, J. 2007. Potato yield and tuber set as affected by phosphorus fertilization. Master Project in the Horticultural Science Programme. Department of Horticulture, Swedish University of Agricultural Science.
- El-Jaoual, T.; Cox, D. A. 1998. Manganese toxicity in plants. *Journal of Plant Nutrition* 21(2):353-386.
- Elrashini, M.A. 2001. Selection of an appropriate phosphorus test for soils. Lincoln, Nebraska, Estados Unidos, Soil Survey Laboratory, National Soil Survey Center, NRCS, USDA. Disponible en https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051918.pdf.
- Estrada, M. 2005. Manejo y procesamiento de la gallinaza. *Revista Lasallista de Investigación* 2.

- Fagenia, N; Barbosa, M; Moreira, A; Guimarães, C. 2009. Foliar fertilization of crop. *Journal of Plant Nutrition* 32(6);1044-1064.
- Fagenia, N. K.; Baligar, V. C.; Wright, R. J. 1988. Aluminum toxicity in crop plants. *Journal of Plant Nutrition* 11(3).
- Fernandez, G.; Ebert, G.; Winkelman, V. 2004. Iron supply to tobacco plants through foliar application of iron citrate and ferric dimerum acid. *Physiology Plantarum* 122(3):380-385.
- Fox, R.L.; Kampratt, E.J. 1970. Phosphate sorption isotherms for phosphorus requirements of soils. *Soil Science Society Proc.* 34.
- Fox, R.L.; Nirohimoto, R.K.; Thompson, J.R.; de la Peña, R. 1974. Comparative external phosphorus requirements of plants growing in tropical soils. Honolulu, Hawaii, Estados Unidos de América, College of Tropical Agriculture, University of Hawaii. Hawaii Agricultural Experiment Station Technical Paper 1517.
- Gaitán, J. J.; López, C.R. 2007. Análisis del gradiente edafológico en la región andina patagónica. Buenos Aires, Argentina, INTA.
- Gallegos, C; Olivares, E; Vásquez, R; Zavala, F. 2000. Absorción de nitrato y amonio por plantas de nopal en hidroponía. *Terra* 18(2).
- García, B; Pantoja, C. 1998. Fertilización del cultivo de la papa en el departamento de Nariño. *In* Guerrero, R. Fertilización de cultivos en clima frío. Bogotá, Colombia, Monómeros Colombo Venezolanos.
- García, J.; Ballesteros, M. I. 2006. Evaluación de los parámetros de calidad para la determinación del fósforo disponibles en suelos. *Revista Colombiana de Química* 35(1).
- García-Sánchez, MJ; Paz, J; Ramos, A; Sanders, D; Fernández, J. 2000. Sodium-dependent nitrate transport at the plasma membrane of leaf cells of the marine higher plant. *Plant Physiology* 122:879-885.
- Gonzáles García. 2009. Relación amonio/nitrato en la producción de hierbas aromáticas en hidroponía. *Agricultura Técnica en México* 35(1).
- Guerrero, R. 1998. La fertilización con azufre para el cultivo de papa en Colombia. *In* Guerrero, R. Fertilización de cultivos en clima frío. Bogotá, Colombia, Monómeros Colombo Venezolanos.
- Gupta, U.C.; Macleod, J.A.; Macleod, L.B. 1973. Effects of aluminum, manganese, and lime on toxicity symptoms, nutrient composition, and yield of barley grown on a podzol soil. *Plant and Soil* 39(2):413-421.
- Hageman, R.H. 1984. Ammonium versus nitrate nutrition of higher plants. *In* R.D. Hauck, J.D. Beaton, C.A.I. Goring, R. G. Hoeft, G.W. Randall y D.A. Russell (eds.). Nitrogen in crop production. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. p. 67-88.
- Harper, S.M.; Edwards, D.G.; Kerven, G.L. 1995. Effects of organic acid fractions extracted from *Eucalyptus camaldulensis* on root elongation of maize in the presence and absence of aluminum. *Plant and Soil* 171(1). Disponible en www.springerlink.com/index/j791642526840658.pdf.

- Hassan, F.A. 1998. Water quality for microirrigation. *Irrigation Journal*, May-Jun, Estados Unidos de América.
- Henríquez, C. 2005. Sorción y desorción de fósforo en un andisol en Costa Rica dedicado al cultivo del café, caña de azúcar y bosque. *Agronomía Costarricense* 29(3).
- Hernández, R. 2001. Nutrición mineral de las plantas. Mérida, Venezuela, Universidad de los Andes.
- Herrera, J. 2004. Curvas de absorción de NPK en papa. Informe Anual FHIA-La Esperanza.
- Herrera, J. 2004. Respuesta del Cultivo de la Papa (*Solanum tuberosum*) a la Aplicación de Diferentes Niveles de Nitrógeno, Fósforo y Potasio. In Informe Anual FHIA-La Esperanza.
- Hue, N.V.; Vega, S.; Silva, J. 2001. Manganese toxicity in a Hawaiian Oxisol affected by soil pH and organic amendments. *Soil Science Society of America Journal* 65:153-160.
- Jackson, L.E.; Burger, M.; Cabagnaro, T.R. 2008. Roots, nitrogen transformation, and ecosystem service. *Plant Biology* 59.
- James, R. 1992. Ohio livestock manure management guide. Ohio State University Extension. Bulletin 604.
- Jingquan, Y.; Dewei, C. 1988. Effects of different nitrogen forms on tomato grown in carbonized rice hull. *Soilless Culture* 4:51-61.
- Kank, S.; Kafkafi, U. 2000. Absorción de potasio por los cultivos en distintos estadios fisiológicos. Disponible en www.ipipotash.org/udocs/sesion%20v.pdf.
- Kaya, C.; Kirnak, H.; Higgs, D. 2001. Enhancement of growth and normal growth parameters by foliar application of potassium and phosphorus in tomato cultivars grown at high (NaCl) salinity. *Journal of Plant Nutrition* 24(2).
- Knudsen, D.; Peterson, G. A.; Pratt, P. F. 1982. Lithium, sodium and potassium. In Page, A. L.; Miller, R. H.; Keeney, D. R. (eds.). *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. Series Agronomy 9.* Madison, Wisconsin, Estados Unidos de América, ASA, SSSA. p. 225-246.
- Krauss, A. 2000. El potasio y el stress biótico. Disponible en www.ipipotash.org/udocs/sesion%20v.pdf.
- Krouk, G.; Lacombe, B.; Bielach, A.; Perrine-Walker, F.; Malinska, K.; Mounier, E.; Hoyerova, K.; Tillard, P.; Leon, S.; Ljung, K.; Zazimalova, E.; Benkova, E.; Nacry, P.; Gojon, A. 2010. Nitrate-regulated auxin transport by NRT1.1 defines a mechanism for nutrient sensing in plants. *Developmental Cell* 18(6):927-937.
- Lafitte, H.R. 2001. Estreses abióticos que afectan el maíz. In Paliwal, R. *El maíz en los trópicos, mejoramiento y producción.* Roma, Italia, FAO.
- López de Rojas, I. 1980. Respuesta al encalado en suelos oxisoles y ultisoles de Venezuela. *Agronomía Tropical* 31(1-6):37-57.
- Lorenz, O.A.; Maynard, D.N. 1980. *Knott's handbook for vegetable growers.* 2 ed. Hoboken, Nueva Jersey, Estados Unidos de América, John Wiley & Sons.

- McGrath, S. P.; Rorison, I. H. 1982. The influence of nitrogen source on the tolerance of *Holcus lanatus* and *Bromus erectus* to manganese. *New Phytologist* 91(3):443-452.
- Mckean, S. 1993. Manual de análisis de suelo y tejido vegetal: una guía teórica y práctica de metodologías. Palmira, Colombia, CIAT. Documento de trabajo 129.
- Mistrik, I.; Ullrich, C.I. 1996. Mechanism of anion uptake in plant roots: quantitative evaluation of H^+/NO_3^- and $H^+/H_2PO_4^-$ stoichiometries. *Plant Physiology and Biochemistry* 34:629-636.
- Mokolobate, M.S.; Haynes, R.J. 2002. Comparative liming effect of four organic residues applied to an acid soil. *Biology and Fertility of Soils* 35:79-85.
- Molina, E. 1998. Encalado para la corrección de la acidez del suelo. San José, Costa Rica, ACCS.
- Montgomery, DR. 2007 Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Science of United States of America*. Disponible en <http://www.pnas.org/cgi/content/full/104/33/13268>.
- Montesinos, C. 1997. Manejo biológico del fósforo en el suelo. *Revista Clades, Agroecología y Desarrollo* 8-9 nov.
- Morillo, A.; Pérez, E.; Linares, J.; Román, N. 1980. Efecto de la fertilización foliar y al suelo con cloruro de potasio a plantas de café en vivero. s. l., Centro de Investigación Agropecuaria Regional Los Andes.
- Mosali, J.; Desta, K.; Teal, R. 2006. Effect of foliar application of phosphorus on winter wheat grain yield. *Journal of Plant Nutrition* 29:2147-2163.
- Mosali, J.; Girma, K.; Teal, R.K.; Freeman, K.W. 2004. Effect of foliar application of phosphorus on winter wheat grain yield, phosphorus uptake and use efficiency. Stillwater, Oklahoma, Estados Unidos de América, Department of Plant and Soil Science. Oklahoma State University.
- Muñoz, R. 1998. Fertilización de la papa en Antioquia. *In* Guerrero, R. Fertilización de cultivos en clima frío. Bogotá, Colombia, Monómeros Colombo Venezolanos. p. 28-46.
- Muñoz, R. 1999. Efecto de la saturación por bases, relaciones Ca:Mg en el suelo y dosis de fósforo sobre el crecimiento y nutrición mineral del maíz. *In* Congreso Agronómico Nacional y de Recursos Naturales; Congreso Nacional de Suelos (XI, III, San José, Costa Rica).
- Naramabuye, F.X.; Haynes, R.J. 2006. Effect of organic amendments on soil pH and Al solubility and use of laboratory indices to predict their liming effect. *Soil Science* 171(10):754-763.
- Naramabuye, F.X.; Haynes, R.J. 2007. The liming effect of five organic manures when incubated with an acid soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 170(5):615-622.
- Navarro, S.; Navarro, G. 2003. Química agrícola. 2 ed. Madrid, España, Mundiprensa.
- Neilsen, D; Neilsen, GH; Sinclair, AH; Litehan, DJ. 1992. Soil phosphorus status, pH and manganese nutrition of wheat. *Plant and Soil* 145(1):45-50.
- Nico, AI; Monaco, CI; Dal Bello, G; Alippi, HE. 2003. Efecto de la adición de enmiendas orgánicas al suelo sobre la capacidad patogénica de *Rhizoctonia solani*: test de patogenicidad y actividad biológica de metabolitos volátiles y difusibles. *Revista de Investigaciones Agropecuarias* 32(3):173-192.

- Hernández Gil, R. 2001. Nutrición mineral en plantas superiores. LibroBotánicaonline. Disponible en <http://www.forest.ula.ve/~rubenhg/nutricionmineral/>
- Oko, B.; Eneji, A.; Binang, W.; Irshad, M.; Yamamoto, S.; Honna, T.; Endo, T. 2003. Effect of foliar application of urea on reproductive abscission and grain yield of soybean. *Journal of Plant Nutrition* 26(6):1223-1234.
- Olías, M.; Cerón, J.C.; Fernández, I. 2005. Sobre la utilización de la clasificación de las aguas de riego del U.S. Laboratory Salinity (USLS). *Geogaceta* 37:111-113.
- Oliveira, F. A.; Camello, C.; Mascarenhas, A. 2001. Disponibilidad de K y sus relaciones con Ca y Mg en soya cultivada en invernadero. *Scientia Agrícola* 58(2):329-335.
- Orihuela-Calvo, D.L.; Hernández, J.C.; Pérez-Mohedano, S.; Marijuan de Santiago, L. 2005. Estudio de la variación y evolución de índices de calidad agroquímicos e hidroquímicos de las aguas drenadas de columnas de suelos calizos de Andalucía. *In* Samper, J.; Paz, A. Estudios de la zona no saturada del suelo 7. La Coruña, España, Universidade da Coruna.
- Ortiz, R. 2006. La mosca doméstica (*Musca domestica* L.): un enemigo potencial. Caracas, Venezuela, Fundaceta.
- Pérez, J.C.; Osorio, N.W.; Álvarez, C.L. 2004. Crecimiento, absorción de fósforo y morfología de la raíz en espárrago inoculado con hongos micorrizales y pseudomonas fluorescentes. *Revista de la Facultad Nacional de Agronomía* 57(2).
- Periódico Vallevirtual. ICA (Instituto Colombiano Agropecuario) establece requisitos para la producción de gallinaza y pollinaza. Consultado 10 jun. 2008. Disponible en vallevirtual.blogspot.com.
- Potash & Phosphate Institute. 1994. Manual internacional de fertilidad de suelos. Atlanta, Georgia, Estados Unidos de América.
- Preciado, D.L. 2006. ¿Es efectiva la sanitización de la cama? ¿Cómo medir la efectividad del proceso? Colombia. Disponible en mvz.unipaz.edu.co/textos/preproducción/compostaje.pdf.
- Ramos, A.; Durango, J.; Grandett, G.; Díaz, B.; Barrera, J. L. 2006. Evaluación de las diferentes formas de potasio en suelos de la zona platanera de Córdoba (Colombia). *Agronomía Colombiana* 24:2.
- Raven, P. H.; Ever, R. F.; Eichhorn, S.E. 1992. *Biología de las plantas* 2. Barcelona, España, Editorial Reverte.
- Rehm, G. 2009. Soil cation ratios for crops production. Minneapolis, Estados Unidos de América, Soil Science Department. University of Minnesota. Publication 533.
- Rivero, E.; Cruzate, G.; Turati, R. 2006. Azufre, boro y zinc: mapas de disponibilidad y reposición en suelos de la zona pampeana. *In* Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo (20, Salta, Jujuy, Argentina). Actas.
- Rodríguez, M.; Cárdenas, E.; Alcantar, G.; Etchevers, J.; Aguilar, A.; Colinas de León, J.A. Penetración de un fertilizante foliar en tomate. Disponible en [Natres.psu.ac.th/ling/soil congress/dbb/sym14/6551-t.pdf](http://Natres.psu.ac.th/ling/soil%20congress/dbb/sym14/6551-t.pdf).

- Rodríguez, P.; Lema, M.J.; Gonzáles, G.; Gonzales Pimentel, S. 2005. Evaluación del reactivo Mehlich 3 como extractante multielemental. *In* Congresso Ibérico de Ciências Hortícolas (5. 2005). Comunicações. Vol. 3. Protecção das culturas, fertilização e substratos, economia e comercialização 3. Lisboa, Portugal, Associação Portuguesa de Horticultura.
- Rojas, C. 1998. Disponibilidad del fósforo y su corrección. Santiago, Chile, INIA.
- Romheld, V.; El-Fouly, M. 1999. Aplicación foliar de nutrientes: retos y limitantes en la producción agrícola. *In* International Workshop on Foliar Fertilization (2, Bangkok, Tailandia). Proceedings. Bangkok, Tailandia, Soil and Fertilizer Society of Thailand.
- Rosas, A.; Rengel, Z.; Rivera, A.; Mora, M. 2011. Phosphorus nutrition alleviates manganese toxicity in *Lolium perenne* and *Trifolium repens*. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 174(2):210-219.
- Rout, G. R.; Santamantaray, S.; Das, P. 2001. Aluminum toxicity in plants: a review. *Agronomie* 21:3-21.
- Salas, R. 1996. El aluminio en la relación suelo planta. *In* Congreso Nacional Agronómico/ II Congreso de Suelos (10, 2, San José, Costa Rica). Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica.
- Sánchez, J. M. 2000. Hipomagnesia. Un desbalance metabólico subestimado en la producción de ganado lechero en Costa Rica. *Nutrición Animal Tropical* 6(1).
- Sánchez, P. A.; Camacho, E. 1981. Suelos del Trópico: caracterización y manejo. San José, Costa Rica, IICA.
- Sandoval, M.; Alcantar, G.; Tirado, J.L.; Aguilar, A. 1992. Effect of the NH₄/NO₃ ratio on GS and PEP Case activities and dry matter production in wheat. *Journal of Plant Nutrition* 15:2545-2557.
- Shaaban, S.H.A; Manal, F.M.; Afifi, M.H.M. 2009. Humic acid foliar application to minimize soil applied fertilization of surface-irrigated wheat. *World Journal of Agricultural Sciences* 5(2):207-210.
- Sibanda, H.M.; Young, S.D. 1986. Competitive adsorption of humus acids and phosphate on goethite, gibbsite and two tropical soils. *European Journal of Soil Science* 37:2 p. 197-204
- Sierra, C.; Santos, J.; Kalazich, J. 2002. Manual de fertilización del cultivo de la papa en la zona sur de Chile. Santiago, Chile, INIA.
- Silva, A.; Rosa, E.; Haneklaus, S. 2003. Influence of foliar boron application on fruit set and yield of hazelnut. *Journal of Plant Nutrition* 26(3):561-569.
- Sims, J.T. 2000. Soil Test Phosphorus: Bray and Kurtz P-1. *In* Pierzynski, G.M. (ed.). Methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residuals, and waters. Kansas State University. Southern Cooperative Series Bulletin 396.
- Singh, R.; Sharma, R.; Tyagi, S. 2007. Pre-harvest foliar application of calcium and boron influences physiological disorder, fruit yield, and quality of strawberry. *Scientia Horticulturae* 112(2)215-220.
- Stevens, G.; Gladbach, T.; Motavalli, P.; Dunn, D. 2005. Soil calcium: magnesium ratios and lime recommendations for cotton. *The Journal of Cotton Science* 9:65-71.

- Suthipradit, S.; Edwards, D.G.; Asher, C.J. 1990. Effects of aluminum on tap-root elongation of soybean, cowpea and green gram grows in the presence of organic acids. *Plant and Soil* 124(2).
- Tani, M.; Kunimoto, A.; Kato, T.; Koike, M. 2010. Effect of organic ligands on phosphate adsorption and availability in Andisols of eastern Hokkaido, Japan. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World. 1 – 6 August 2010, Brisbane, Australia. Published on DVD. p. 52-55.
- Teusscher, H.; Adler, R. 1965. *El suelo y su fertilidad*. Ciudad de México, México, Compañía Editorial Continental.
- Thompson, LM; Troeh, FR. 1998. *El suelo y su fertilidad*. 4 ed. Barcelona, España, Editorial Reverte.
- Tisdale, S.L.; Nelson, W.L.; Beaton, J.D. 1985. Soil and fertilizer phosphorus. *In* *Soil Fertility and Fertilizer*. Nueva York, Estados Unidos de América, McMillan Publishing Company. p. 189-248.
- Toledo, M. 2007a. Efecto de niveles de encalado en tres suelos de la zona alta de Intibucá a 30 días después de la aplicación. Informe anual FHIA-La Esperanza, Intibucá, Honduras.
- Toledo, M. 2007b. Efecto de dos enmiendas orgánicas sobre la producción de Coliflor en un suelo con concentraciones altas de Al^{+3} y Mn^{+2} . Informe Anual FHIA-La Esperanza, Intibucá, Honduras.
- Toledo, M. 2011. Efectividad de tres formas de aplicación del fertilizante fosfórico a un suelo fijador de fosforo sobre la productividad de plantas de papa (Var. Provento). Informe Técnico Anual del Programa Papa 2011. Honduras, DICTA, SAG.
- Toledo, M. 2011. Efecto de dos dosis de gallinaza al suelo sobre el crecimiento y producción de plantas de papa crecidas en un suelo ácido y alto en manganeso. Informe Técnico Anual del Programa Papa 2011. Honduras, DICTA, SAG.
- Toledo, M. 2012. Crecimiento de plantas de papa en sustrato inerte y fertilizadas mediante una solución nutritiva. Informe Técnico Anual del Programa Papa. Honduras, DICTA/SAG.
- Trinidad, A.; Aguilar, D. 1999. Fertilización foliar: un respaldo importante en el rendimiento de los cultivos. *Terra* 17(3).
- VALAGRO SpA. 2004. *Los microelementos en la nutrición vegetal*. Roma, Italia, Instituto Experimental para la Nutrición de las Plantas.
- Vallejo, O; López, D. 1988. Variabilidad en el contenido de micronutrientes para suelos cultivados con caña de azúcar. *Ciencias del Suelos* 6(1).
- Vanegas, J.; Cajuste, L. J.; Trinidad, A.; Gavi, F. 1999. Correlación y calibración de soluciones extractantes del fósforo aprovechable en Andisoles de la Sierra Tarasca. *Terra* 17(4).
- Vázquez, S.; Morales, L. A.; Dalurzo, H. C. 2004. Disponibilidad del fósforo en suelos ácidos de Misiones, Argentina. *Agricultura Técnica* 64(1).
- Vitorello; V. A.; Capaldi, F.R.; Stefanuto, V. A. 2005. Recent advances in aluminum toxicity and resistance in higher plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology* 17(1).
- Vlamis, J.; Williams, D. 1973. Manganese toxicity and marginal chlorosis of lettuce. *Plant and Soil* 39(2).

- Wayne, S. 2001. The nitrogen and acidity store. Albany, Australia, Agronomic Acumen. Newsletter N° 80.
- Whalem, J.K.; Chang, C.; Clayton, G.W.; Carefoot, J.P. 2000. Cattle manure amendments can increase the pH of acid soil. *Soil Science Society of America Journal* 64:962-966.
- Wild, A.; Russell, E. J. 1992. *Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas*. Madrid, España, Mundi-Prensa.
- Yan, F.; Schuber, S.; Mengel, C. 1996. Soil pH increase due to biological descarboxilación of organic anions. *Soil Biological and Biochemistry* 28:617-624.
- Zalba, P.; Bravo, O.; Amiotti, M.; Peinemann, N. 2002. Métodos alternativos para determinar la disponibilidad de fósforo en suelos agrícolas. *Ciencias del Suelo* 20(1).
- Ziadi, N.; Sen Tran, T. 2006. Mehlich 3 Extractable Elements. *In* Carter, M.R.; Gregorich, E.G. (eds.). *Soil sampling and methods of analysis*. 2 ed. Boca Raton, Estados Unidos de América, CRC Press.

ANEXOS

Peso atómico y valencia de las bases intercambiables

	Símbolo	Peso atómico	Valencia
Calcio	Ca ⁺⁺	40	2
Magnesio	Mg ⁺⁺	24	2
Potasio	K ⁺	39	1
Sodio	Na ⁺	23	1

Relaciones entre formas químicas de algunos nutrientes

Fósforo (P) x 2.2919	= P ₂ O ₅
Potasio (K) x 1.2046	= K ₂ O
Calcio (Ca) x 1.3992	= CaO
Magnesio (Mg) x 1.6582	= MgO

Rangos normales de densidad aparente* de los suelos de acuerdo con su clase textural

Textura	Densidad aparente (gr/cm ³)
Arenoso	1.65
Franco arenoso	1.40 - 1.60
Franco limoso	1.35 - 1.45
Franco arcilloso	1.30 - 1.40
Arcilloso	1.20 - 1.35

* La densidad aparente es el peso de un volumen de suelo sin disturbar, incluyendo los poros, y que se obtiene dividiendo el peso seco entre su volumen.

Factores de conversión para pasar de ppm a kg/ha para diferentes valores de densidad aparente y profundidad del suelo

Densidad aparente gr/cm ³ *	De ppm a kg/ha a 15 cm de profundidad del suelo, multiplique por:	De ppm a kg/ha a 20 cm de profundidad del suelo, multiplique por:
1.0	1.50	2.0
1.10	1.65	2.20
1.20	1.80	2.40
1.30	1.95	2.60
1.33	2.0	2.66
1.40	2.10	2.80
1.50	2.25	3.0
1.60	2.40	3.20
1.65	2.47	3.30

* Densidad aparente: gr/cm³ es equivalente a kg/m³, por ejemplo, 1.33 gr/cm³ = 1.33 kg/m³

Factores de conversión para pasar de cmoles/kg de suelo a kg/ha de las bases intercambiables a diferentes valores de densidad aparente y profundidad del suelo.

Densidad aparente gr/cm ³	De cmoles/kg de suelo a Kg/ha a 15 cm de profundidad del suelo, multiplique por:			De cmoles/kg de suelo a Kg/ha a 20 cm de profundidad del suelo, multiplique por:		
	Potasio	Calcio	Magnesio	Potasio	Calcio	Magnesio
1.0	585.0	300	180	780	400	640
1.10	643.5	330	198	858	440	664
1.20	702.0	360	216	936	480	288
1.30	760.5	390	234	1014	520	312
1.33	778.0	399	239.4	1037.4	532	319.2
1.40	819.0	420	252	1092	560	336
1.50	877.5	450	270	1170	600	360
1.60	936	480	288	1248	640	384
1.65	965.25	495	297	1287	660	396

Tablas de conversión

Longitud

Unidad	cm	m	km	pulgada	pie	yarda	milla
1 cm	1	0.01	0.00001	0.393701	0.0328083	0.0109361	6.21371 E-6
1 m	100	1	0.001	39.3701	3.28084	1.09361	6.21371 E-4
1 km	1.0 E+5	1000	1	3.93701 E+4	3280.4	1093.6	0.621371
1 pulgada	2.54	0.0254	2.54 E-5	1	0.08333	0.027778	1.57828 E-5
1 pie	30.48	0.3048	3.048 E-4	12	1	0.333333	1.8939 E-4
1 yarda	91.44	0.9144	9.144 E-4	36	3	1	5.6818 E-4
1 milla	1.60934 E+5	1609.34	1.60934	6.336 E+4	5280	1760	1

Superficie

Unidad	cm ²	m ²	km ²	pulgada ²	pie ²	yarda ²	milla ²
1 cm ²	1	1.0 E-4	1.0 E-10	0.1550	1.0764 E-3	1.1960 E-4	3.8611 E-11
1 m ²	1.0 E+4	1	1.0 E-6	1550.0	10.7639	1.19598	3.8611 E-7
1 km ²	1.0 E+10	1.0 E+6	1	1.5500 E+09	1.07610 E+7	1.1960 E+6	0.38611
1 pulgada ²	6.4516	6.4516 E-4	6.4616 E-10	1	6.9444 E-3	7.7161 E-4	2.4910 E-10
1 pie ²	929.03	0.092903	9.2903 E-8	144	1	0.111111	3.5868 E-8
1 yarda ²	8.3613 E+3	0.83613	8.3613 E-7	1296	9	1	3.2283 E-7
1 milla ²	2.5900 E+10	2.5900 E+6	2.58998	4.0145 E+9	2.7878 E+7	3.0976 E+6	1

Volumen

Unidad	cm ³	litro	m ³	pulgada ³	pie ³	galón
1 cm ³	1	0.001	1.0 E-6	6.1024 E-2	3.5315 E-5	2.6417 E-4
1 litro	1000	1	0.001	61.024	3.5315 E-2	0.26417
1 m ³	1.0 E+6	1000	1	6102.4	35.315	264.17
1 pulgada ³	16.3871	1.6387 E-2	1.6387 E-5	1	5.7870 E-4	4.3290 E-3
1 pie ³	2.8317 E+4	28.3168	2.8317 E-2	1728	1	7.4805
1 galón	3785.4	3.7854	3.7854 E-3	231.00	0.13368	1

Masa

Unidad	g	kg	ton métrica.	onza	lb	ton corta
1 gramo	1	0.001	1.0 E-6	3.5274 E-2	2.2046 E-3	1.1023 E-6
1 kilogramo	1000	1	0.001	35.274	2.2046	1.1023 E-3
1 ton métrica	1.0 E+6	1000	1	3.5274 E+4	2204.6	1.1023
1 onza	28.349	2.8349 E-2	2.8349 E-5	1	0.06250	3.1250 E-5
1 libra	453.59	0.45359	4.5359 E-4	16	1	5.0000 E-4
1 ton corta	9.0718 E+5	907.18	0.90718	3.2000 E+4	2000	1

Densidad

Unidad	g/cm ³	g/l	kg/m ³ (SI)	lb/pie ³	lb/galón
1 g/cm ³	1	1000	1000	62.4280	8.34540
1 g/l	0.001	1	1.000	6.2428 E-2	8.3454 E-3
1 kg/m ³ (SI)	0.001	1.000	1	6.2428 E-2	8.3454 E-3
1 lb/pie ³	1.6018 E-2	16.0185	16.0185	1	0.13368
1 lb/galón	0.119826	119.826	119.826	7.48052	1

Presión

Unidad	atmósfera	bar	kg/cm ²	lb/pulg. ²	mm Hg	pascal (SI)	pulg. H ₂ O
1 atmósfera	1	1.01325	1.03323	14.696	760	1.01325 E+5	406.782
1 bar	0.986923	1	1.01972	14.5038	750.064	1.0 E+5	401.463
1 kg/cm ²	0.967841	0.980665	1	14.2233	735.561	9.80665 E+4	393.701
1 lb/pulg. ²	6.8046 E-2	6.8948 E-2	7.0307E-2	1	51.7151	6894.76	27.6799
1 mm Hg	1.3158 E-3	1.3332 E-3	1.3595 E-3	1.9337 E-2	1	133.322	0.535239
1 pascal	9.8692 E-6	1.0 E-5	1.0197 E-5	1.4504 E-4	7.5006 E-3	1	4.0146 E-3
1 pulg.H ₂ O	2.4583 E-3	2.4909 E-3	2.5400 E-3	3.6127 E-2	1.86833	249.089	1

Energía

Unidad	BTU	cal	hp-hr	J (SI)	kW-hr	l-atm.	pie-lbr
1 BTU	1	252.164	3.93015 E-4	1055.056	2.9307 E-4	10.4126	778.169
1 caloría	3.96567 E-3	1	1.55856 E-6	4.1840	1.16222 E-6	4.1293 E-2	3.08596
1 hp-hr	2544.43	6.4162 E+5	1	2.68452 E+6	0.74570	2.6494 E+4	1.9800 E+6
1 joule (SI)	9.47817 E-4	0.239006	3.72506 E-7	1	2.77778 E-7	9.8692 E-3	0.737562
1 kW-hr	3412.14	8.60421 E+5	1.34102	3.6 E+6	1	3.5529 E+4	2.6552 E+6
1 litro-atm.	9.6038 E-2	24.2173	3.7744 E-5	101.325	2.8146 E-5	1	74.7335
1 pie-lbr	1.2851 E-3	0.324048	5.0505 E-7	1.35582	3.7662 E-7	1.3381 E-2	1

Potencia

Unidad	BTU/hr	hp	kcal/hr	kW	pie-lbr/s	W (SI)
1 BTU/hr	1	3.93015 E-4	0.252164	2.93071 E-4	0.216158	0.293071
1 hp	2544.43	1	641.616	0.745700	550.0	745.700
1 kcal/hr	3.96567	1.55857 E-3	1	1.16222 E-3	0.857211	1.16222
1 kilowatt	3412.14	1.34102	860.421	1	737.562	1000
1 pie-lbr/s	4.62624	1.81818 E-3	1.16657	1.3558 E-3	1	1.35582
1 watt (SI)	3.41214	1.34102 E-3	0.860421	0.001	0.737562	1

Temperatura

Centígrados a Fahrenheit	[Grados centígrados] x 9/ 5 + 32
Fahrenheit a centígrados	[Grados Fahrenheit] - 32 x 5/9

Condición de suelo y requerimientos nutricionales para optimizar el rendimiento de cultivos hortícolas (Castro, 1998).

Especie	Requerimientos físicos			Requerimientos nutricionales (Kg/ha/cosecha)								Rdto (t/ha)
	Textura ¹	Profundidad raíces (cm)	M.O. ²	pH	Tolerancia salinidad	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S	
Tomate	Franco	30-60	Medio	5.8 - 6.2	Sensibilidad media	110	35	150	130	18	12	30
Chile dulce	Franco	30-60	Bajo	5.8 - 7.0	Sensibilidad media	80	160	70				15
Pepino	Franco	30-60	Alto	5.6 - 7.0	Sensibilidad media	95	135	50				40
Repollo	Franco	30-45	Medio	5.5 - 6.5	Sensibilidad media	120	45	160	100	6		35
Lechuga	Franco	20-30	Alto	5.5 - 6.7	Sensible	100	50	208	46	12		30
Zanahoria	Franco	30-45	Alto	6.0 - 6.5	Sensible	192	55	238	166	15		40
Remolacha	Franco	30-45	Medio	5.5 - 6.5	Tolerancia media	125	35	134	73	62		30
Espinaca	Franco	15-30	Bajo	6.0 - 7.0	Sensibilidad media	100	80	50				30
Coliflor	Franco	20-35	Alto	5.5 - 6.8	Sensibilidad media	80	80	150	100	6		20
Acelga	Franco	20-35	Medio	6.0 - 8.0	Sensibilidad media	75	36	120				20
Arveja	Franco	45-60	Alto	5.5 - 6.8	Sensibilidad media	110	35	70	67	13		2.8
Habichuela	Franco	45-60	Alto	5.5 - 6.8	Sensibilidad media	110	24	84	60	12		12
Haba	Franco	45-60	Alto	5.0 - 6.5	Sensibilidad media	155	48	120	70			2.4
Ajo	Franco	15-30	Medio	6.0 - 6.5	Sensibilidad media	100	50	100	15	9	18	15
Cebolla	Franco	25-35	Alto	6.0 - 7.0	Sensible	120	80	150	40	10	18	50

1. Suelo franco: Que tiene igual proporción de arcilla, limo y arena.

2. M.O.: Materia orgánica. Bajo= < 4 %; Medio= 4 - 6 %; Alto= > 6 %.

Absorción¹ y extracción² de nutrientes por algunos cultivos

Algodón (<i>Gossypium spp.</i>)											
Absorción total (kg/t)						Extracción total (kg/t)					
N	P	K	Ca	Mg	S	N	P	K	Ca	Mg	S
150	25	100		24	25	70	13	33			12
Café (<i>Coffea arabica L.</i>)											
Absorción total (kg/t)						Extracción total (kg/t)					
N	P	K	Ca	Mg	S	N	P	K	Ca	Mg	S
24	2	19	2	1	1	5	0.5	6			
Tabaco (<i>Nicotiana tabacum L.</i>)											
Absorción total (kg/t)						Extracción total (kg/t)					
N	P	K	Ca	Mg	S	N	P	K	Ca	Mg	S
65	9	100	36	8	10	32	6	36	30	4	5
Soya (<i>Glycine max L.</i>)											
Absorción total (kg/t)						Extracción total (kg/t)					
N	P	K	Ca	Mg	S	N	P	K	Ca	Mg	S
75	7	39	16	9	4	55	6	19	3	4	3
Maíz (<i>Zea mays L.</i>)											
Absorción total (kg/t)						Extracción total (kg/t)					
N	P	K	Ca	Mg	S	N	P	K	Ca	Mg	S
22	4	19	3	3	4	15	3	4	0.2	2	1
Arroz (<i>Oryza sativa L.</i>)											
Absorción total (kg/t)						Extracción total (kg/t)					
N	P	K	Ca	Mg	S	N	P	K	Ca	Mg	S
22	4	26	3	2	1	15	3	3	0.1	1	0.6
Sorgo (<i>Sorghum bicolor L.</i>)											
Absorción total (kg/t)						Extracción total (kg/t)					
N	P	K	Ca	Mg	S	N	P	K	Ca	Mg	S
30	4	21		5	4	20	4	4	0.9	1	2
Pimiento (<i>Capricum spp.</i>): Para cosecha de 25.5 t/ha											
Absorción total (kg/ha)						Extracción total (kg/t)					
N	P	K	Ca	Mg	S	N	P	K	Ca	Mg	S
153	58	243		48							
Melón (<i>Cucumis melo</i>): Para cosecha de 22 t/ha											
Absorción total (kg/ha)						Extracción total (kg/t)					
N	P	K	Ca	Mg	S	N	P	K	Ca	Mg	S
73	23	131		13							

1. Absorción de nutrientes por tonelada métrica de cosecha.

2. Cantidad de nutrientes que se sustraen de la parcela en la cosecha.

Cacao (<i>Theobroma cacao</i> L.): Cosecha de 992 kg/ha											
Absorción total (kg/ha)						Extracción total (kg/t)					
N	P	K	Ca	Mg	S	N	P	K	Ca	Mg	S
466	121	821		133							
Plátano/banano: Cosecha de 2.9 t/ha											
Absorción total (kg/t)						Extracción total (kg/t)					
N	P	K	Ca	Mg	S	N	P	K	Ca	Mg	S
448	448	1681		175							
Lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.): Para 50 t de cosecha/ha											
Absorción total (kg/t)						Extracción total (kg/t)					
N	P	K	Ca	Mg	S	N	P	K	Ca	Mg	S
101	34	207									
Tomate (<i>Lycopersicon esculentum</i>): Para 99 t/ha											
Absorción total (kg/t)						Extracción total (kg/t)					
N	P	K	Ca	Mg	S	N	P	K	Ca	Mg	S
260	97	519		40	60						
Cebolla (<i>Allium cepa</i>): Para cosecha de 75 t/ha											
Absorción total (kg/t)						Extracción total (kg/t)					
N	P	K	Ca	Mg	S	N	P	K	Ca	Mg	S
202	90	179		20	41						

1. Absorción de nutrientes por tonelada métrica de cosecha.
2. Cantidad de nutrientes que se sustraen de la parcela en la cosecha.



GOBIERNO DE LA
REPÚBLICA DE HONDURAS



SECRETARÍA DE AGRICULTURA
Y GANADERÍA

Dirección de Ciencia y Tecnología Agropecuaria (DICTA)



UNIÓN EUROPEA



CONTÁCTENOS

Unidad Coordinadora del PRIICA (UCP)
Instituto Interamericano de Cooperación para la
Agricultura (IICA)

Sede Central. San José, Vásquez de Coronado,
San Isidro 11101-Costa Rica, América Central
Apartado 55-2200

Teléfonos: (506) 2216-0313 / 0320

Fax: (506) 2216-0233

Correo electrónico: infopriica@iica.int

www.iica.int

www.priica.sictanet.org