

Trabajo de grado

MITOS Y REALIDADES DE LAS CALES Y ENMIENDAS EN COLOMBIA

Héctor Osorno Henao

M.Sc. Ciencias, geomorfología y suelos

Director

Raúl Darío Zapata

Ph.D.

Profesor asociado Universidad Nacional de Colombia sede Medellín

Universidad Nacional de Colombia sede Medellín

Medellín

2012

DEDICADO A:

Maryori mi esposa y a mis hijas Laura y Manuela, quienes comparten conmigo que en la vida para obtener un logro se requiere de sacrificio, esfuerzo y dedicación; gracias por su apoyo y comprensión durante todo el tiempo que duro este proyecto.

AGRADECIMIENTOS:

A CALES RIOCLARO NARANJO SCA por apoyar el crecimiento personal y profesional de sus empleados engrandeciendo el recurso humano que es el capital más valioso de una empresa; gracias por el aporte económico y el tiempo que me concedieron para hacer realidad este estudio.

A los profesores Raúl Darío Zapata y Nelson Walter Osorio por sus enseñanzas, exigencias, motivación y acompañamiento permanente durante todo el tiempo, a mis compañeros de maestría y a la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

CONTENIDO

A. Introducción	7
B. Planteamiento del problema	9
C. Justificación	10
D. MITOS Y REALIDADES DE LA APLICACIÓN DE LA CAL	11
1. Cales y enmiendas	11
2. Encalamiento	11
3. Beneficios de usar cales	13
4. Productos para encalar	15
• Caliza	16
○ Yacimientos de calizas	17
• Cal Dolomita	18
○ Yacimientos de dolomita	18
• Cal viva	19
• Cal hidratada	19
• Magnesita	19
○ Yacimientos de magnesita	19
• Cal magnesiana	20
• Yeso	20
○ Yacimientos de yeso	21
• Silicato de magnesio	22
• Roca Fosfórica	23
○ Yacimientos de apatitas	24
• Escorias industriales	24
• Enmiendas Complejas	25
• Cal de blanquear	26
5.Cuál es el mejor tipo de cal?	26
• Caliza o Dolomita	27
• Cal o yeso	27
6. Solubilidad de las cales	28

7.	La cal para corregir acidez	30
	• El yeso en la corrección de la acidez del suelo	31
	• El yeso acidifica el suelo	31
	• El aluminio	32
8.	La cal aporta nutrientes	34
	• Calcio	35
	• Magnesio	37
	• Azufre	37
	• Fósforo	39
	• Silicio	39
9.	Diferencia entre fertilizantes y cales o enmienda	40
	• Se puede aplicar un fertilizante sin haber aplicado antes una enmienda	40
10.	Yacimientos de cal en Colombia	41
11.	Geología de las cales	42
12.	Como se produce la cal	43
	• Producción de cal en Colombia	44
13.	Determinación de los requerimientos de cal	44
	• Cuanta cal se debe aplicar	46
	• Aplicación de cal	47
	• Época de aplicación de la cal	48
	• Duración del efecto de la cal	48
	• Se puede aplicar cal de por vida	49
14.	Todos los cultivos necesitan cal	49
15.	Todos los suelo necesitan cal	50
16.	El uso de las cales o enmiendas en los suelos	52
	• La cal mejora el suelo	52
	• La cal mejora las propiedades químicas del suelo	52
	• Las cales mejoran las propiedades físicas del suelo	52
	• Efecto de las cales con los microorganismos del suelo	53
	• Efectos de las cales con la materia orgánica	53
	• La cal en la disminución de la toxicidad por aluminio	53
	• La cal en el control de los helechos	54
	• La cal para control de enfermedades	54

• El encalado previene hongos	54
• La cal repele los insectos	55
• La cal con las lombrices del suelo	55
• La cal en la calidad del fruto	55
• Qué efectos tiene la cal con metales pesados	55
• La cal en el compostaje	55
• La cal puede mejorar una toxicidad por Boro	56
• La cal daña los suelos	56
• Efecto de las cales en suelos sulfato ácidos	56
• Efectos de la cal en suelos sódicos	56
• La cal quema?	57
17. Efectos del Sobre-encalamiento	57
18. Lugares para la compra las cales	59
19. Normas de calidad deben cumplir las cales	59
20. Uso industrial de las cales	60
21. Historia de la cal	61
E. BIBLIOGRAFÍA	62

INTRODUCCIÓN

En las diferentes regiones agrícolas de Colombia es normal escuchar muchos mitos alrededor de las cales y enmiendas, tanto de los agricultores, como los empresarios y técnicos, entendiéndose por mito las creencias de una persona o comunidad la cual la considera como historia verdadera o puede ser también una cosa a la que se le atribuyen cualidad o excelencias que no tienen (RAE, 2001).

Existen muchas creencias y desconocimiento sobre los materiales para encalar, es normal escuchar agricultores que dicen que si la cal no les pica la nariz cuando la aplican, esa cal no sirve, refiriéndose a la cal viva; o técnicos que dicen que la cal solo sirve para pintar paredes, porque la cal no es soluble en agua y que solo sirven las fuentes de calcio que vienen formuladas como fertilizantes.

Además se escucha a vendedores de cales y enmiendas decir que la cal que cada uno vende es la única que sirve, pues esta si es soluble en agua y hacen demostraciones donde comparan diferentes cales diluyéndolas en vasos con agua.

El desconocimiento en la materia es tan grande que el agricultor cuando va a encalar siempre pide en el almacén la cal más económica porque su creencia es que todas las cales son iguales y que sirven para lo mismo, cuando hoy en el mercado existen muchas fuentes de las mal llamadas “cales” que son materiales para enmendar o corregir condiciones químicas no deseables en los suelos ácidos. También es común escuchar en el campo que las aplicaciones de cal se hagan con base en la experiencia de un vecino, y en muchas ocasiones con suelos diferentes, cultivos diferentes, climas diferentes, entre otras.

Los suelos ácidos en el mundo se encuentran principalmente en la zona tropical. En Colombia aproximadamente el 80% de los suelos son ácidos, pertenecen a la zona húmeda y cálida, que por ser mayoritariamente húmedo y por exceso de precipitación se lavan las bases que están en el suelo como el calcio, magnesio, potasio y sodio, cuando estos elementos se lixivian los suelos pasan a tener condiciones ácidas (Malagon, 2003).

Según el IGAC (2003) la cobertura que presentan los principales órdenes de suelo de mayor a menor porcentaje en todo el territorio nacional es: 31,4% andisoles, 24,3% inceptisoles, 20% entisoles, 10,1% oxisoles y 4,5% ultisoles y 9,7 otros tipos de suelos en menores proporciones. La mayoría de los inceptisoles y entisoles corresponden a suelos distróficos, predominantemente ácidos y con bajo nivel de nutrientes que muestran la gran limitación de nuestros suelos desde el punto de vista de la fertilidad. La mayoría de los suelos de la zona andina, amazonia y Orinoquia Colombiana presentan pH bajos (condiciones de acidez). En buena parte de las cordilleras predominan el cuarzo en la fracción arena, seguida por el feldespato, los anfíboles y las micas, y en los oxisoles y ultisoles de la amazonia predomina

el cuarzo en la fracción arena y la caolinita con o sin gibsita en la fracción arcilla (IGAC, 1988).

El presente trabajo intenta dar respuesta y fundamentos teóricos a la mayoría de mitos o inquietudes más comunes que tienen los agricultores y técnicos del sector agrícola en lo referente a: tipo de productos para encalar, época y dosis apropiada de aplicación, calidad y poder neutralizante, entre otros y resaltar la importancia del estudio detallado y analítico del suelo para tomar una decisión acertada para aplicar enmiendas y fertilizantes del suelo.

PROBLEMA

La acidez del suelo, unida a la poca disponibilidad de nutrientes, es una de las mayores limitantes que pueden inducir la baja productividad de suelos ácidos. Aunque la acidificación es un proceso natural, la agricultura, la polución y otras actividades humanas aceleran este proceso (Hue, 2008).

Debido al aumento de áreas acidificadas en el mundo y a la necesidad de producir más alimentos, es fundamental entender la acidez del suelo, con el fin de desarrollar prácticas de manejo (Zapata, 2004).

En Colombia aproximadamente el 80% de los suelos son ácidos, estos requieren un adecuado manejo para corregir o enmendar sus problemas oportunamente y de esta manera lograr cosechas rentables.

El manejo de la acidez del suelo por parte de la mayoría de agricultores en Colombia es todavía un mito, pues existen muchas creencias y desconocimientos sobre los materiales para encalar, específicamente en lo relacionado con: tipo de producto, época y dosis apropiada de aplicación, calidad y poder neutralizante.

Lamentablemente, aunque existe buena bibliografía del tema, la teoría se queda en las bibliotecas y pocos conocimientos que llegan al campo son llevados por los vendedores de productos encalantes que buscan vender sus productos usando estrategias no siempre adecuadas para el cultivo sino para la venta. La aplicación de cales o enmiendas se hacen por diferentes motivos, pero en muy pocas ocasiones se hace a partir de un análisis del suelos que permita predecir el manejo adecuado.

JUSTIFICACIÓN

Cada día toma más importancia el manejo técnico de la fertilización y corrección de los desequilibrios químicos en los diferentes suelos ácidos, aún más, cuando estamos ubicados en una zona tropical, con altas precipitaciones que facilitan la lixiviación de las bases e incremento de la acidez del suelo.

Con este trabajo se pretende dar respuesta de manera clara y justificada a los mitos recopilados con el fin de aportar claridad técnico científico a todo lo asociado con el manejo de la acidez del suelo.

Existen diversos tipos de cales, cada una con características diferentes, dependiendo del tipo de suelo (pH, nutrientes, arcillas, clima, orden, relieve) y del tipo de cultivo (exigencias nutricionales, tolerancia al aluminio) se puede escoger la fuente adecuada, la dosis, el momento de aplicación, de tal manera que tanto económicamente como nutricionalmente se saque el mejor provecho del encalamiento.

Un encalamiento adecuado puede traer beneficios tanto al suelo como al cultivo, mejorando las propiedades físicas, químicas y biológicas de este para el posterior uso con plantas, sin embargo un diagnóstico inapropiado, una dosis equivocada puede tener dos posibles efectos, i) o no se ve ningún resultado, ii) se llega a un sobre-encalamiento del suelo, lo que trae efectos negativos tanto para el suelo como para la planta. Por esta razón se resalta la importancia de hacer los estudios de suelos adecuados para el manejo óptimo del suelo y lograr productividades y cosechas exitosas.

MITOS Y REALIDADES DE LA APLICACIÓN DE LA CALES Y ENMIENDAS EN COLOMBIA

1 Cales y enmiendas

Del latín *calx*, cal es el nombre con que se designan diversas formas del óxido de calcio y algunas de las sustancias en que este interviene o que se obtienen a partir de él (RAE, 2001).

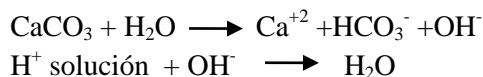
Las cales o enmiendas son todo material cuya acción fundamental es el mejoramiento de las condiciones químicas del suelo, particularmente la acidez del mismo. Se refiere a todo material capaz de prevenir o corregir la acidez del suelo.

Se conoce como cal principalmente al carbonato de calcio proveniente de rocas calizas o mármol y dolomitas, pero actualmente se utilizan una gran variedad de rocas ultra básicas que algunos las denominan “harinas de roca” para encalar y por eso se habla mejor de enmiendas o correctivos para el suelo.

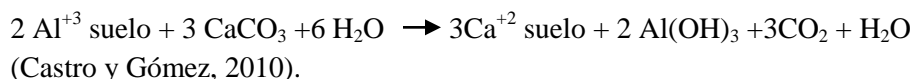
Las cales o enmiendas usadas en el encalamiento como correctivos de la acidez, son productos comerciales tipificados como fuentes minerales de origen natural o industrial que portan en su composición carbonatos, óxidos, hidróxidos, sulfatos y silicatos de calcio y/o magnesio. Debido a su diferente naturaleza química, estos materiales difieren en su capacidad para neutralizar la acidez del suelo (Molina, 1998; Castro y Gómez, 2010).

2 Encalamiento

Encalar es la acción de aplicar cal, producto finamente molido, que se debe preferiblemente incorporar al suelo unos meses antes de la siembra del cultivo para corregir la acidez del suelo, la cual puede ser acidez activa (hidrogeniones de la solución del suelo (H^+)) y/o acidez intercambiable (causada principalmente por el aluminio (Al^{+3})). La reacción química cuando se aplica una cal para corregir la acidez activa es:



La reacción para neutralizar acidez intercambiable es:



Encalar es el proceso de aplicar cales o enmiendas al suelo para corregir su acidez, en la que se dan reacciones de neutralización; es decir, la cal consume H^+ de las diferentes fuentes de acidez del suelo aumentando el pH del suelo (Zapata, 2004).

El encalado es una práctica agrícola que se usa desde tiempos remotos para mejorar la productividad de los suelos ácidos. Este proceso tiene un efecto múltiple sobre diferentes características químicas, físicas y microbiológicas del suelo, por este motivo el encalado es objeto de estudio en el mundo.

Encalar mejora las propiedades del suelo y de acuerdo con las necesidades de la planta en elementos nutritivos y condiciones de pH, se producen generalmente mejoras en la productividad. Sin embargo el exceso del encalado en suelos tropicales es muy peligroso y puede tener resultados catastróficos en la agricultura (Fassbender, 1986).

Las prácticas de encalamiento de suelos ácidos en la actualidad son muy frecuentes. Se reconoce la importancia y beneficios del encalamiento, pero dicha práctica no es vista ni bien entendida en su significado y repercusión agronómica (Castro y Gómez, 2008).

Entre las inconsistencias mayormente encontradas que le restan eficiencia a los planes de control de acidez de los suelos, podemos citar (Castro y Gómez, 2010):

- La práctica de encalamiento se ha considerado simplemente como la práctica de aplicar cales al suelo con un criterio generalmente empírico y universal.
- No se utilizan los suficientes criterios técnicos para diagnosticar la acidez. En la mayoría de los casos sólo se tiene en cuenta el pH y se deja de lado indicadores tan importantes como acidez intercambiable ($Al^{3+} + H^+$), saturación de aluminio, sumatoria de bases (Ca+Mg+K), CICE y fijación de fósforo. Esto ha limitado desde el frente técnico el verdadero sentido, significado y alcances de las prácticas de encalamiento.
- Los cálculos para obtener las dosis de encalado, generalmente no se realizan a partir de $CaCO_3$ equivalente ($t \cdot ha^{-1}$), son definidos subjetivamente y relacionados de manera directa a cales comerciales de un mismo tipo.
- Se desconocen los conceptos de origen, calidad, pureza, composición y reactividad de los materiales encalantes comerciales, aspectos determinantes en el cálculo del $CaCO_3$ de dichos materiales.
- Muchos de los materiales encalantes comerciales (cales agrícolas, dolomitas, fosfosilicatos de calcio, etc.) no cumplen las especificaciones técnicas que contempla el ICONTEC en cuanto a normas de calidad.

-
- No se realizan pruebas de encalamiento que, por métodos de incubación en el laboratorio, apoyen decisiones de campo para implementar planes integrales de control de acidez que busquen adicionalmente mejoramiento en las concentraciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} y P en el suelo.
 - Muchas prácticas de encalamiento se hacen de acuerdo a experiencias previas en tipos de suelos, climas, relieves y cultivos diferentes.

Para mejorar la sostenibilidad de la fertilidad de suelos ácidos y hacerlos menos dependiente de la fertilización mineral se emplean metodologías que incluyen los siguientes pasos:

- Realizar el análisis químico completo del suelo.
- Diagnosticar el grado de acidez a través de los criterios tratados (pH, cmoles $\text{Al}^{3+}\text{kg}^{-1}$ de suelo, % saturación Al^{3+} y sumatoria de bases (Ca+Mg+K)).
- Calcular las t.ha^{-1} de CaCO_3 equivalente, considerar el nivel de concentración de Ca^{2+} , Mg^{2+} y P reportado en el análisis de suelos, con el fin de buscar a criterio técnico, la proporción de t.ha^{-1} de CaCO_3 equivalente que del total calculado, aplicaría combinando el uso de materiales encalantes comerciales para generar una relación de balance, que mejore las condiciones químicas originales del suelo. Para realizar este ejercicio es necesario conocer el CaCO_3 de los materiales encalantes (cales agrícolas, dolomitas, fosfosilicatos de calcio, etc.) comercializados en la región o de otras partes.

3 Beneficios de usar cales

Los suelos tropicales en su mayoría son de origen ácido, primero por las condiciones climáticas del trópico (altas precipitaciones y temperaturas), segundo por la formación geológica y por su génesis dando origen a suelos ácidos, con pH que oscilan entre 4.0 y 5.5, estos suelos presentan altos contenidos de aluminio y bajos contenidos de bases. Para lograr la máxima productividad agrícola y un manejo adecuado del suelo y los cultivos es necesario encalar.

El encalamiento llevado a cabo correctamente tiene los siguientes beneficios (León, 1999; Espinosa, 2003; Lora, 2010)

- Aumentar el pH del suelo, disminuyendo la acidez.
- Disminuir o eliminar la toxicidad del aluminio, hierro y manganeso.
- Aumentar la disponibilidad del fósforo.

-
- Incrementar la aprovechabilidad de algunos nutrientes.
 - Aumentar el contenido de calcio y magnesio.
 - Mejorar la actividad microbiana, especialmente para la fijación simbiótica de nitrógeno.
 - Reducir la actividad de hongos patógenos del suelo, al disminuir la acidez.
 - Mejorar el proceso de nitrificación y mineralización de la materia orgánica (Motovali *et al.*, 1996).
 - Mejorar la estructura del suelo, especialmente en suelos arcillosos.
 - Mejorar los rendimientos del cultivo, al controlar el pH (Lukin y Epplin, 2003).

El efecto del encalado en el desarrollo de las plantas, muchas veces es múltiple a través de su influencia sobre diferentes características de los suelos (Fassbender, 1986).

En la India demostraron los efectos positivos al encalar los suelos para el cultivo del maní, donde se aumentó el crecimiento de la planta, debido al aumento de los niveles de Ca^{2+} , Mg^{2+} y P, y la disminución del Al^{3+} , se mejoró la fijación biológica de nitrógeno, aumentándose los rendimientos del cultivo (Basu *et al.*, 2008).

En palma de aceite se evita la pudrición del cogollo por *Phytophthora palmivora*, encalando los suelos antes de la siembra para aumentar el pH y los niveles de Ca^{2+} . (Laing, 2010).

La aplicación de cales en suelos ácidos tiene un efecto positivo, incrementando la comunidad de microorganismos benéficos del suelo como bacterias, hongos y actinomicetos (Xuel *et al.*, 2010), en general en suelos ácidos predominan los hongos, al encalar y subir el pH predominan las bacterias (Baath y Anderson, 2003).

El encalamiento mejora la nodulación de *Trifolium subterraneum* en plantas (fijación biológica de nitrógeno) y el crecimiento de las raíces en suelos ácidos (Richardson *et al.*, 1988). Mejora el rendimiento y crecimiento de *Phaseolus vulgaris* por la nodulación de cepas de *Rhizobium* (Ramos y Boddey, 1987).

En el sur de Brasil la aplicación de cales en los suelos ácidos mejoró los rendimientos del cultivo de soya, los costos de producción el pH y la estructura del suelo (Caires *et al.*, 2006).

En el sur de Nigeria Aladesanwa y Akinbobola (2008) encontraron que hay un efecto en la eficiencia de herbicidas para el maíz, mejorando el rendimiento del cultivo.

Las plantaciones de teca generalmente se dan en suelos ácidos, donde saturaciones del 3% de acidez reducen significativamente el crecimiento medio anual en altura y valores de 60% de saturación de calcio favorecen su crecimiento; en Costa Rica se evaluó el encalado en el cultivo de la teca y encontraron que la adición de 1 kg de carbonato de calcio aumentó el crecimiento anual de la teca en un 59% (Alvarado y Fallas, 2004).

4 Productos para encalar

Existen varios productos para encalar. La mayoría provienen de minas o yacimientos geológicos como son las calizas, dolomita, rocas fosfóricas, yesos, silicatos de magnesio, magnesitas y subproductos industriales como las Escorias Thomas.

Los principales productos para encalar también llamados cales o enmiendas, son los carbonatos, hidróxidos, óxidos y silicatos de Ca y/o Mg. La acción neutralizante de estos materiales no se debe en forma directa al Ca y Mg, sino a los aniones que están ligados a estos cationes: CO_3^{2-} , OH^- , SiO_3^{2-} (Espinosa J., 2003). Los OH^- generados por carbonatos, hidróxidos y silicatos son los que neutralizan la acidez del suelo al propiciar la precipitación del Al^{3+} como $\text{Al}(\text{OH})_3$ y la formación de agua. Entre los materiales que sirven para abonar y que contiene cal esta la caliza, marga y conchas de ostras molidas, las cuales se conoce que son restauradoras de terrenos.

Entre los tipos de cales y/o enmiendas más comunes que sirven para abonar se pueden citar las siguientes:

- Carbonato de calcio o cal agrícola: CaCO_3 es conocido como calcita se obtiene a partir de la roca caliza, es la enmienda más utilizada.
- Oxido de calcio: o cal viva (CaO), se obtiene por la calcinación del carbonato de calcio. Su manejo debe ser cuidadoso debido a la alta alcalinidad de este material, es muy cáustico, esto principalmente porque su reacción es exotérmica.
- Hidróxido de calcio: Este material se conoce como cal apagada y se obtiene hidratando el CaO , su manejo es más fácil y reacciona rápidamente.
- Cal dolomita: Es un carbonato doble de calcio y magnesio en relaciones variables.
- Carbonato de magnesio: es conocido como magnesita y se aplica en suelos ácidos muy deficientes en magnesio.

-
- Oxido de magnesio: Este material resulta de la calcinación del carbonato de magnesio.
 - Escorias de alto horno o escorias básicas.
 - Roca fosfórica.
 - Yeso.
 - Silicato de magnesio.
 - En la actualidad se formulan las enmiendas de acuerdo a las necesidades del suelo y /o cultivo.
 - Conchas de ostras molidas.

Caliza

La caliza, cal agrícola o carbonato de calcio que contiene una composición de CaCO_3 CaO: 56%, CO_2 : 44%. El manganeso y el hierro pueden substituir el calcio. La cal agrícola molida tiene un efecto lento en la corrección de la acidez del suelo por acción débil de los ácidos húmicos (Suescun, 1988).

De acuerdo con las normas técnicas Colombiana NTC 163 (2000) la cal agrícola para enmienda, cuyo contenido no debe ser inferior al 70% expresados como carbonato de calcio.

La caliza, tiene una geometría sencilla, son grupos de carbonatos combinados con cationes divalentes tales que la coordinación de radios tiene una coordinación de 6, esta estructura es tipo calcita, donde se alternan las capas de cationes metálicos con los aniones carbonatos. Debido a que todos los miembros del grupo de la calcita son isoestructurales, es posible la sustitución de cationes metálicos dentro de los límites impuestos por sus tamaños relativos, el hierro ferroso (Ra: 0,74A), el manganeso (Ra: 0,80A) y el magnesio (Ra: 0,66A), se sustituyen unos a otros dando lugar a sustancias intermedias. La sustitución del calcio por estos iones no es tan completa ni tan arbitraria debido al gran tamaño del ion calcio (Ra: 0,99A).

La cristalografía de las calizas es hexagonal-R, escalenoédrica. Cristales de hábitos extremadamente variados: prismático, romboédrico y escalenoédrico.

La caliza se conoce por su dureza, exfoliación perfecta, color claro y brillo vítreo (Dana Hurbult, 1960).

Yacimientos de calizas

La calcita es uno de los minerales más corrientes y difundidos. Aparece como enormes y extensas masas de rocas sedimentarias, en las cuales la calcita es el mineral más importante, siendo el único mineral presente en ciertas calizas. Las calizas metamórficas cristalinas se conocen con el nombre de Mármol.

La Creta es un depósito pulverulento de carbonato de calcio, de grano fino. La calcita es un constituyente importante de las margas y areniscas calcáreas. Las rocas calizas se han formado, en gran parte, por la deposición en grandes espesores, de material calcáreo a base de caparzones y esqueletos de los animales marinos, en el fondo de los mares; sólo una pequeña proporción de estas rocas se ha formado directamente por la precipitación del carbonato de calcio.

Yacimientos como depósito de cuevas, las aguas calcáreas al evaporarse en las cuevas formadas en las calizas, depositan con frecuencia calcita en forma de estalactitas, estalagmitas e incrustaciones. La calcita es generalmente semitraslúcida y de color amarillento claro. Las aguas de fuentes calcáreas, frías o calientes, forman alrededor del manantial depósitos de calcita que se conocen con el nombre de travertino o tobas. En las regiones calizas se hallan numerosos depósitos de travertino celular. El depósito de Mammoth Hot Springs, Yellowstone Park, es célebre y tiene un origen similar.

Calizas silíceas. Los cristales de calcita pueden incluir a veces cantidades considerables de arenas silíceas (hasta un 60%) y formar lo que se conoce con el nombre de cristales de areniscas. Yacimientos de este tipo se encuentran en Fontainebleau, Francia (calizas de Fontainebleau) y en Bad Lands, Dakota del Sur.

La calcita es un mineral secundario en las rocas ígneas, como producto de descomposición de silicatos cálcicos. Se hallan recubriendo las cavidades amigdaloides de las lavas. En muchas rocas metamórficas y sedimentarias, en mayor o menor proporción es el material de cementación en ciertas areniscas de color claro. La calcita es también el mineral filoniano más común, y aparece como ganga con toda clase de menas metálicas. Resultaría completamente imposible citar todos los distritos importantes donde existen yacimientos de calcita en sus diversas formas. Algunas localidades son notables por hallarse calcita muy bien cristalizada; así sucede en Andreasberg en las montañas del Harz, en diversos lugares de Sajonia; en Cumberland, Derbyshire, Durham, Cornwall y Lancashire, Inglaterra; Islandia; Guanajuato, México. En los Estados Unidos, en Joplin, Missouri, en el distrito de cobre del lago Superior; Rossie, New York. En España, en Peñalara, Bellmunt, Linares, etc. (Dana Hurbult, 1960).

Cal Dolomita

La dolomita consiste en un doble carbonato de calcio y magnesio. Su composición es un carbonato de calcio y carbonato de magnesio (CO₃)CaMg, CaO: 30,4%, MgO: 21,7%, CO₂:47,9%. Se considera que una cal es dolomítica si al menos el 15% es de MgO.

La estructura de la dolomita es parecida a la de la calcita, con capas de cationes normales al eje c, alternando con capas de iones carbonatos, pero en la dolomita las capas de cationes son alternativamente de calcio y magnesio.

La cristalografía de la dolomita es hexagonal-R, romboédrica. Los cristales están formados generalmente por romboedro fundamental, su estructura es como la calcita pero la mitad del calcio es substituido por el magnesio (Dana Hurbult, 1960).

Yacimientos de dolomita

La dolomita aparece principalmente en masas rocosas extensas formando las calizas dolomíticas y su equivalente cristalino, el mármol dolomítico. Los yacimientos son del mismo tipo de la caliza.

La dolomita como roca se cree que es de origen secundario, por transformación de la caliza ordinaria por reemplazo del calcio por magnesio. También como un mineral filoniano, principalmente en los filones de plomo y zinc que atraviesan las calizas. El contenido de (MgO) en una dolomita debe ser mínimo del 15%.

Se hallan en grandes masas rocosas en las regiones dolomíticas del Tirol meridional; en buenos cristales en Binnenthal, Suiza; Teruel; México. En los Estados Unidos se encuentran formando masas sedimentarias en muchos estados del Oeste Medio. En buenos cristales en Joplin, Missouri (Dana Hurbult, 1960)

Cal viva

La cal viva se obtiene calcinando los carbonatos de calcio en hornos intermitentes o continuos. El contenido de calcio aumenta a través de este proceso llegando a 82-96% de CaO. La ventaja del uso de la cal viva se debe a la mayor velocidad de la reacción de las partículas de cal con el complejo coloidal, tiene un efecto rápido en la corrección de la acidez. El efecto neutralizante de la cal viva es más rápido que el del carbonato de calcio (Cales de Antioquia, 1979).

Cal hidratada

La cal hidratada o apagada es la cal viva hidratada con agua después de ser calcinada, también conocida como hidróxidos de calcio (Ca(OH)₂) tiene un efecto rápido en la corrección de la acidez. Generalmente tiene un contenido hasta del 95% de CaO, el resto son impurezas como arena, arcillas y otros óxidos. La cal apagada o hidratada tiene la ventaja que es mucho más reactiva por provenir del tratamiento térmico siendo por lo tanto más soluble y su acción es más rápida (Cales de Antioquia, 1979).

Magnesita

La magnesita es un carbonato de magnesio, CO_3Mg , MgO : 47,8%, CO_2 :52,2%. El hierro ferroso substituye al magnesio y la serie isomorfica completa se extiende hasta la siderita. Se encuentran también pequeñas cantidades de calcio y magnesio. La estructura es como la de la calcita y su cristalografía es hexagonal-R, escalenoédricas, rara vez en cristales. Generalmente en masas criptocristalinas en blanco, compacta y terrosa, menos frecuente en masas granulares exfoliadas bastas o finas (Dana Hurbult, 1960).

Yacimientos de magnesita

La magnesita se encuentra corrientemente con filones derivados de la alteración de la serpentina por la acción de aguas carbónicas. Dichas magnesitas son compactas y corrientemente coloidales, y a menudo contiene sílice opalina. Las capas de magnesitas cristalinas exfoliable son:

- De origen metamórfico asociadas a esquistos talcosos, cloríticos o micáceos.
- De origen sedimentario, por sustitución en las rocas calizas por la acción de soluciones que contienen magnesio, formándose la dolomita como producto intermedio.

Depósitos importantes de este tipo se encuentran en Manchuria; en Satka en los montes Urales, y en Estiria, Australia. Los depósitos más famosos del tipo criptocristalino se hallan en la isla de Eubea, Grecia.

En los Estados Unidos, la variedad compacta se halla en masas irregulares, en la serpentina de la Coast Range, California. Grandes masas de tipo sedimentario se encuentran en Chewelah en Stevens County, Washington, y en el Paradise Range, Nye County Nevada (Dana Hurbult, 1960).

Cal magnesiana

Las cales magnesianas (nombre sugerido por el ICA), son la mezcla física del carbonato de calcio y del silicato de magnesio en diferentes relaciones peso a peso siendo la más común de 60:40 respectivamente, esta formulación es similar a la dolomita en sus contenidos de CaO y MgO . La cal magnesiana garantiza un contenido de CaO del 28-39% y de MgO del 11-16% y aporte de silicio que puede tener un efecto benéfico para el suelo y los cultivos. La diferencia además de las fuentes es el aporte de silicio que aportan las cales magnesianas. Según Lindsay (1979) la cantidad de magnesio en gramos disuelto a pH 6.0 es mayor en el silicato de magnesio que el carbonato de magnesio contenido en una dolomita.

Yeso

El yeso o sulfato de calcio ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) es una fuente que proporciona calcio (17-27%) y azufre (14-18%). El yeso es un insumo agrícola que mejora el sistema radicular de las plantas debido a que el anión sulfato reacciona con el ion aluminio precipitándolo, además por ser tan soluble puede llegar hasta el subsuelo. El principal uso del yeso en la agricultura mundial es en la corrección de suelos sódicos (Raij, 2008).

Existen diferentes fuentes de yeso como lo son: yeso de mina, con una pureza del 80%, yeso como subproducto de la acidulación total de la roca fosfórica en la industria de los fertilizantes, del proceso del ácido cítrico (citricación partiendo de jugos de caña).

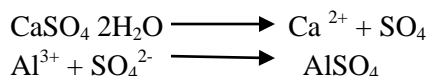
El yeso es una excelente enmienda cuando se maneja adecuadamente. La velocidad de disolución del yeso depende de factores como:

- Profundidad de incorporación
- Calidad de la mezcla
- Tiempo de contacto entre las partículas de la enmienda y del suelo
- Distribución del tamaño de partículas.

Entre mayor sea la profundidad de incorporación y la distribución del yeso en el perfil de suelo mayor será la solubilidad efectiva por efecto de mayor capacidad de disolución. La disolución del yeso aumenta a medida que la RAS es mayor (García y Pantojal, 1998) razón por la cual su acción resulta más notoria en suelos altamente sódicos.

Aunque no presenta un efecto correctivo directo sobre la acidez, en la altillanura colombiana se ha considerado como una práctica interesante la aplicación de yeso en suelos ácidos con altas concentraciones de aluminio, porque actúa con un efecto de profundidad mayor al que ofrecen las cales y, además, no modifica significativamente el pH del suelo por ser una sal neutra.

La aplicación de yeso no cambia el pH pero si elimina aluminio tóxico, proporcionando calcio y generando un efecto en el subsuelo. Con la aplicación de yeso, el desplazamiento del aluminio de la solución del suelo se da a través de los radicales sulfatos, los cuales captan el aluminio de la solución formando el sulfato de aluminio, el cual precipita como una forma de aluminio no tóxica (Castro y Gómez, 2010).



La aplicación de yeso al suelo como la de cualquier fertilizante debe ser prudente y bien formulada por el potencial peligro de lixiviar cationes a través de la formación de pares iónicos (Bernal, 2008).

La cristalografía del yeso es monoclinica, prismática. Los cristales son de hábito prismático; tabular paralelo al segundo pinacoide; forma rómbica con aristas biseladas por las caras. Maglas frecuentes con el primer pinacoide como plano de macla, dando con frecuencia maclas en cola de golondrina. Compacto exfoliable, hojoso, masas granuladas. El espato satinado es un yeso fibroso de brillo sedoso. El alabastro es una variedad de masa de grano fino. La selenita es una variedad que produce hojas de exfoliación incolora y transparente (Dana Hurbult, 1960).

Yacimientos de yeso

El yeso se encuentra ampliamente diseminado en la corteza terrestre tanto en forma de yeso como en su forma anhídrida (sin agua de hidratación). Las formas más puras se encuentran principalmente en regiones volcánicas. El yeso se presenta en forma de evaporito en capas regulares o lentejones, en distintos estados de pureza y en una gran variedad de espesores. El yeso puede encontrarse solo o con anhídrida en forma de depósito primario o como producto de hidratación superficial de la anhídrida.

El yeso es uno de los minerales no metálicos más importantes. Se presenta en cinco variedades:

- Yeso de roca
- Gipsita, forma térrea impura
- Alabastro, variedad translúcida, de grano fino y en masa
- Espato satinado, forma sedosa y fibrosa
- Selenita, forma cristalina transparente

Silicato de magnesio

El silicato de magnesio o serpentina ($Mg_6Si_4O_{10}(OH)_8$), es una roca metamórfica compleja, ultrabásica, formada a partir de una dunita (olivino) $(Mg, Fe)_2 SiO_4$ y Hazburguita (olivino y enstatita-Mg (SiO_4)) (NTC 4801, 2000). Dicha roca está conformada por láminas unidas de silicato de magnesio, en las que intercalan láminas de brucita. La serpentina es una roca compleja en su composición mineralógica y química, que contiene magnesio y sílice y sirve para tratar suelos ácidos.

La adición de silicato de magnesio al suelo, presenta una corrección del pH y disminución del aluminio intercambiable (Lin y klemency, 1981).

En el 2000 Bejarano y Ordoñez evaluaron la adición de serpentina en inceptisoles de los Llanos Orientales cultivados con arroz, ellos encontraron grandes beneficios en el

suelo como: incremento en el pH y disminución en la saturación de aluminio, debido al aumento de bases intercambiables de magnesio y calcio, aumento en el fosforo disponible, aumento en el contenido de ácido ortosilícico soluble. Además también encontraron beneficios en el cultivo del arroz como: incremento en el rendimiento, disminución en el vuelco, vaneamiento y ataque de enfermedades.

En el departamento de Antioquia existen yacimientos de rocas serpentinas en los municipios de Medellín, Angelópolis, Heliconia, Yarumal, Campamento, Ituango, Urrao, Murindó, San Andrés de Cuerquia, Sopetrán y Olaya. Las rocas de los yacimientos de los municipios de Olaya y Angelópolis son usadas para la producción de enmiendas y fertilizantes en la agricultura colombiana (Dana Hurbult, 1960).

Roca Fosfórica

La principal fuente de fosforo es la roca fosfórica, en Colombia este recurso se encuentra a lo largo de la cordillera Oriental, desde Sardinata en Norte de Santander hasta el sur del Huila, aflorando en numerosos sitios a lado y lado de sus vertientes.

Las minas más conocidas son Huila, Sardinata y Pesca (Martínez, 1988). Norte de Santander (municipio de Lourdes, Gramalote), Santander (San Vicente de Chucurrí), Boyacá (Sogamoso, Monguít, Tota, Tunja, Samaná, Turmequé, Toca, Pesca, Jenesano), Huila (municipios de palermo, Aipe, Teurel, Yaguará, Tesalia) y en Tolima (Coyaima, Ortega, Iconozco, Pandi). Estas rocas fosfóricas se presentan en facies geológicas de tipo areniscas, de lutitas y de calizas, siendo las más aptas las areniscas y pudiendo utilizar como solventes sólidos las calcáreas (Suescun, 1899).

El yacimiento de Sardinata tiene 34% de P_2O_5 y reservas que casi llegan a las 10 millones de toneladas (Manjarres, 1971).

Las rocas fosfóricas son minerales derivados del ácido ortofosfórico, conocidas con el nombre de materiales apatitos. Los fosfatos minerales en Colombia son en su mayoría carbonato apatitas, en los cuales el carbonato y el flúor han sido sustituidos por fosfatos y el sodio y el magnesio han sido sustituidos por calcio (León, 1988). Su composición es Fluorofosfato cálcico $(PO_4)_3Ca_5F$, fluorapatito: rara vez $(PO_4)_3Ca_5Cl$, clorapatito y $(PO_4)_3Ca_5OH$. Hidroxilapatito. El F, Cl y (OH) puede substituirse entre sí, dando origen a una forma isomorfa completa. El manganeso puede subsistir parte del calcio.

La roca fosfórica es un fertilizante fosfórico (Goenadi et al., 2000) poco soluble (Rajan et al., 1996; Reddy et al., 2002, Pramanik et al., 2009) y de baja efectividad agronómica (Vassileva et al., 2000); se usa como materia prima para la síntesis de fertilizantes más solubles (Reyes et al., 2001; Batti y Yamar, 2010).

Con el fin de aumentar la solubilidad del fosforo y mejorar la eficiencia de la roca fosfórica, en la investigación se han considerado varios métodos como: acidulación químicamente con ácido sulfúrico y fosfórico, (Gyaneshwar *et al.*, 2002; Reddy *et al.*, 2002; Xiao *et al.*, 2008), otra alternativa es acidulación con microorganismos

solubilizadores de fosfato (Whitelaw 2000; Osorio y Pérez 2000, Vassilev y Vassileva, 2003; Ramírez 2005; Jayasinghearachchi y Seneviratne, 2006; Singh y Reddy, 2011) capaces de producir ácidos orgánicos; disminución del tamaño de partícula, mezclas de rocas fosfóricas con productos formadores de ácidos, alteraciones de las rocas mediante tratamientos térmicos y diferentes métodos de aplicación al suelo (García y Pantojal, 1998).

La cristalografía de los apatito son hexagonal, bipirámides. Comúnmente en cristales de habito prismático largo; algunos prismáticos cortos o tubulares. Generalmente terminados por pirámides importantes de primer orden y frecuentemente, plano basal. Ciertos cristales presentan caras de bipirámide hexagonal y pueden tener un desarrollo muy complejo. También en masas granuladas a masas compactas (Dana Humburt, 1960).

Yacimientos de Apatitas

El apatito es un mineral frecuente, como un constituyente accesorio de todas las clases de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. Se halla también en pegmatitas y filones, probablemente de origen hidrotermal. También en las masas magnéticas titaníferas. Ocasionalmente se concentran en depósitos grandes o en filones asociada a las rocas alcalinas.

Existen grandes yacimientos de apatito en la costa sur de Noruega, entre Lagenssund y Arendal, donde aparece en filones y concavidades asociadas con el gabro. Diseminada en la mena de hierro magnética de Kiruna, Suecia. El apatito aparece en cantidades comerciales en Ontario y Quebec, Canadá. Cristales finos en Renfrew County, Ontario. Allí aparece en cristales y masa en calcita cristalina, en filones y en lechos irregulares a lo largo del contacto de las calizas con las rocas ígneas.

El mayor depósito de mundo está localizado en la península de Kola, cerca de Kirovsk, U.R.S.S., donde se encuentra en grandes masas lenticulares entre dos tipos de rocas alcalinas. El apatito está formando agregados granulados íntimamente asociado la nefelina.

Apatito bien cristalizado se encuentran en diversos lugares del Tirol, en Suiza; Jumilla, España. En los Estados Unidos se lo encuentra en Aubur, Maine; Saint Lawrence County, New York; Alexander County, Carolina del Norte; San Diego County, California.

La variedad colofana es un constituyente importante de la roca denominada fosforita o roca fosfato. Los huesos son fosfato cálcico y de la acumulación de restos animales han derivado grandes masas de fosforita. Existen depósitos comerciales de fosforita en el norte de Francia, Bélgica, España, especialmente en el norte de África, Túnez, Argelia, Marruecos y Rio de Oro. En los Estados Unidos existen depósitos de fosfatos de gran riqueza en el oeste de Tennessee y en Wyoming e Idaho. Depósitos nodulares de fosfatos se encuentran, esporádicamente, a todo lo largo de la costa Atlántica, desde Carolina del Norte hasta Florida, siendo los depósitos más importantes de la Florida (Dana Hurbult, 1960).

Escorias Industriales

Las escorias son subproductos de la fabricación del acero. Tienen una composición variable de acuerdo al tipo de procedimiento del hierro utilizado. El contenido de CaO puede variar entre el 7-20%. Algunas escorias como las Thomas, son utilizadas porque además de su contenido de CaO contiene fósforo como fertilizante fosfatado (Fassbender, 1986).

El Abono Paz del Rio también conocido como calfos o fosfato Thomas tiene como composición 10% de fosforo asimilable, 48% de CaO.

La mayor parte de iones de calcio y magnesio de las escorias de hornos están en forma de silicatos, estos compuestos se disuelven lentamente, si la escoria finamente molida se añade a los suelos, corrigen la acidez muy semejante a los otros materiales de encalamiento, sin embargo su poder efectivo es del orden del 50% del carbonato de calcio (Cales de Antioquia, 1979).

Enmiendas Complejas

Enmiendas complejas es la mezcla de varios correctivos. Son mezclas que se fabrican de acuerdo a un análisis de suelos y las necesidades del cultivo.

La aplicación conjunta de yeso y cal ayuda a reducir los problemas de acidez en el subsuelo, en un periodo de tiempo menor al que se logra con la aplicación exclusiva de cal. La aplicación simultanea de yeso y cal se puede hacer mediante mezclas físicas de ambos materiales directamente en la finca, o a través de un proceso industrial. Normalmente la proporción de la mezcla es de 70-75% de carbonato de calcio o cal dolomita, y de 25 a 30% de yeso. Esto permite la aplicación de los dos correctivos en una sola operación. No es conveniente usar dosis excesivas de yeso en suelos ácidos bajos en calcio y magnesio, debido a que puede incrementar la lixiviación de bases y disminuir la fertilidad de los suelos.

Algunos países que utilizan gran cantidad de enmiendas, como Brasil, han optado por sustituir las cales por una mezcla que es mas “amigable” con el medio ambiente, consistente en un 50% de silicato de calcio y 50% de yeso. Con esta mezcla se obtiene un resultado similar al obtenido con el encalamiento y se evita la emisión de CO₂ a la atmosfera (Bernal, 2008).

Existen enmiendas más complejas, compuestas por cal dolomita, roca fosfórica, silicato de magnesio, yeso y elementos menores como el zinc y el boro. Las ventajas de estas mezclas son muy variables (Osorno y Osorno, 2011):

- En una mezcla balanceada en cuanto al contenido de nutrientes (calcio, magnesio, fósforo, azufre, zinc y boro).
- Se puede requerir menos cantidades de enmiendas para alcanzar el efecto que se lograría solamente con la aplicación de cal.

-
- Se logra un efecto de acondicionamiento en las capas inferiores del suelo, debido a la solubilidad del yeso.
 - Promueve un excelente desarrollo de las raíces del pasto y por lo tanto una mejor utilización de los fertilizantes completos.
 - Se pueden mezclar fuentes de calcio y fósforo sin que se fije éste, debido a la incorporación de silicio a la mezcla, que evite esta reacción.
 - Se puede utilizar en casi todo tipo de suelos ácidos y se puede aplicar incorporando o al voleo sobre praderas establecidas.

Cal de blanquear

La cal de blanquear es el mismo hidróxido de calcio. Es importante al aplicarla tener cuidado, usando la protección adecuada para evitar irritaciones en la piel u órganos expuestos, la gran ventaja es que es más reactiva que un carbonato de calcio por su forma química. Con frecuencia se usa especialmente para la desinfección de suelos por ejemplo en plátano afectado por “moko” se aplica cal de blanquear al sitio y se espera seis meses antes de volver a sembrar una nueva planta.

También es usada para pintar el tronco de los árboles con el fin de protegerlos del sol y por estética en parques.

5 Cuál es el mejor tipo de cal?

La mejor cal es la que necesita el suelo y los requerimientos nutricionales del cultivo que se va a establecer. Para saberlo es necesario hacer análisis de suelos cuyos resultados dan las pautas para definir principalmente varios aspectos como son: qué cal aplicar, cuál es la dosis por hectárea, y cuando volverá a aplicar.

Según Alvarado *et al.*, (2010) uno de los aspectos más importante a considerar en la determinación de la eficiencia agronómica de un material encalante es su calidad, la cual está fundamentada en:

- Pureza química: permite conocer la composición química de la cal, que se ve alterada por la presencia de impurezas como arcillas o minerales de Fe.
- Forma química: de acuerdo a las formas químicas se presentan diferentes capacidades de neutralización y reactividad. Los productos a base de carbonatos y silicatos neutralizan la acidez a través de las bases químicas CO_3^{2-} , SiO_3^{2-} . En tanto los óxidos reaccionan inmediatamente con el agua del suelo transformándolo en hidróxido por lo cual los óxidos e hidróxidos neutralizan el suelo a través del OH^- .

- **Tamaño de partícula:** La fineza de las partículas de la cal determinan su velocidad de reacción, ya que conforme se reduce su tamaño se aumenta el área superficial de contacto. Entre más pequeño sea el tamaño de la partícula la reacción será más rápida y en mayor proporción. El material ideal para el encalamiento debe pasar por un tamiz 10 y 50 % por un tamiz de 100 (Sánchez y Salinas, 2008). De acuerdo con las normas técnicas colombianas NTC 32 (2011) y 326 (2001), el 100% del producto debe pasar el tamiz número 20 (843 μm) y como mínimo el 50% debe pasar el tamiz número 100 (149 μm).
- **Poder relativo de neutralización total (PRNT):** se valora en forma conjunta la pureza química con la fineza, donde EG: Eficiencia granulométrica y EQ: equivalente químico.

$$\text{PRNT} = \frac{\text{EG} * \text{EQ}}{100}$$

El PRNT indica el poder de neutralización de la cal que es capaz de reaccionar en 3 meses

Caliza o Dolomita

De acuerdo con los resultados del análisis de suelos se determina cual es el tipo de cal a utilizar, es decir si el suelo presenta altos contenidos de magnesio bajos contenidos de calcio lo recomendable es aplicar una cal (carbonato de calcio), pero si el contenido de calcio y magnesio son bajos se aplica una Dolomita que aporta los dos elementos.

Cal o yeso

Existe comúnmente una cierta confusión entre el papel de las calces y el yeso en la corrección de la acidez del suelo. Los dos productos son muy diferentes. Las calizas son carbonatos de calcio, son sales básicas que reaccionan con cualquier ácido, se usan universalmente en suelos ácidos. Se usa cal cuando uno de los objetivos es subir el pH del suelo, para disminuir la concentración de Al^{3+} y además subir la concentración de Ca^{2+} . Se usa el yeso cuando ya se ha alcanzado un pH deseado o cercano a la neutralidad, este no corrige la acidez, pero es una buena fuente de calcio soluble y de azufre (Cales de Antioquia, 1979). El yeso es usado en suelos de climas semiáridos o áridos para la remoción del sodio del suelo.

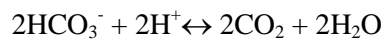
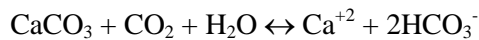
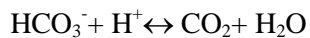
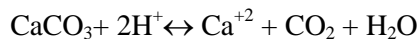
6 Solubilidad de las calces

La solubilidad de un mineral en la solución del suelo depende de varios factores tales como (Lindsay, 1979):

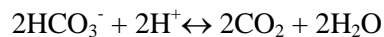
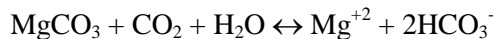
- Grado de acidez
- Actividad de cationes y aniones acompañantes

- Contenido de humedad
- Aireación
- Actividad microbiana
- Producción de CO₂
- Tasa de percolación
- Absorción de nutriente por la planta

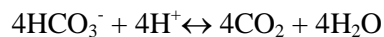
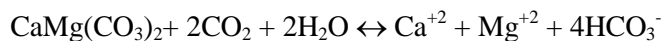
Las cales presentan diferentes solubilidades, siendo las más solubles la cal viva, la cal apagada y siendo menos solubles los carbonatos de calcio y magnesio. Sin embargo para aumentar el pH de los suelos no es la solubilidad de las cales el tema de interés sino la reacción de estas en el suelo. Los carbonatos son los que juegan un papel importante en la reacción como receptor de electrones, son estos los que consumen protones subiendo el pH del suelo. El carbonato de calcio en el suelo puede tener diferentes reacciones de disociación y neutralización (Zapata, 2004):



Los carbonatos de magnesio pueden tener las siguientes reacciones:



La reacción de la dolomita es:



Las cales tienen diferente poder de neutralización, que hace referencia a la capacidad de neutralizar acidez del material. Tomando como referencia el carbonato de calcio puro las reacciones son las siguientes (Lora, 2010):

- $\text{CaCO}_3 + 2\text{HCl} \rightarrow \text{CaCl}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$, el poder de neutralización del carbonato de calcio puro es del 100%. Se necesitan 100 g de carbonato de calcio para neutralizar 2 moles de H^+ .
- $\text{CaO} + 2\text{HCl} \rightarrow \text{CaCl}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$, el poder de neutralización del óxido de calcio puro es del 179%. Se necesitan 56 g de óxido de calcio para neutralizar 2 moles de H^+ .
- $\text{Ca(OH)}_2 + 2\text{HCl} \rightarrow \text{CaCl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$, el poder de neutralización del hidróxido de calcio puro es del 135%. Se necesitan 74 g de hidróxido de calcio para neutralizar 2 moles de H^+ .
- $\text{MgCO}_3 + 2\text{HCl} \rightarrow \text{MgCl}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$, el poder de neutralización del carbonato de magnesio puro es del 119%. Se necesitan 84g de carbonato de magnesio para neutralizar 2 moles de H^+ .
- $\text{MgO} + 2\text{HCl} \rightarrow \text{MgCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$, el poder de neutralización del óxido de magnesio puro es del 250%. Se necesitan 40 g de óxido de magnesio para neutralizar 2 moles de H^+ .
- $\text{Mg(OH)}_2 + 2\text{HCl} \rightarrow \text{MgCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$, el poder de neutralización del hidróxido de magnesio puro es del 172%. Se necesitan 57 g hidróxido de magnesio para neutralizar 2 moles de H^+ .

La importancia de conocer el poder de neutralización de las enmiendas es para calcular la cantidad a aplicar de acuerdo a la saturación de la acidez que tolera el cultivo a establecer.

La cantidad de agua que llega al suelo tiene efecto en la reactividad de la cal. La solubilidad de la cal en agua pura a 20 °C es de 0.013gL^{-1} . Para disolver 2.5 toneladas de cal a una profundidad de 10 cm, es necesario una lluvia de 19,23 mm. La solubilidad del carbonato de calcio se incrementa con la presión del CO_2 , por lo que en el suelo esta solubilidad se debería incrementar. En la Tabla 1 se presenta la solubilidad del carbonato de calcio a diferentes valores de pH en función de las necesidades de agua requeridas. En ella se observa que entre más ácido sea el suelo menos cantidad de agua necesita para la disolución. Se asume que solo ocurre reacción ácido base y no influye la adsorción de Ca^{+2} por el complejo de intercambio.

7 La cal para corregir acidez

La principal función que se le atribuye a las calces es corregir la acidez del suelo. Un diagnóstico adecuado de los problemas de acidez y su correcto manejo permite mejorar las condiciones químicas del suelo (Schreffler y Sharpe, 2003) que restringen la

absorción de nutrientes y que podrían afectar el crecimiento radical de especies sensibles a la acidez (Alvarado y Fallas, 2004; Castro y Gómez, 2008, 2010)

Tabla 1. Cantidades de lluvia necesarias para disolver 2.5 toneladas de carbonato de calcio por hectárea en función del pH del suelo (Scott y Fisher, 1989).

pH (20°C)	Solubilidad (gL ⁻¹)	Lluvia (mm)
7.00	0.013	19.2
5.70	0.052	4.8
5.20	0.117	2.4
4.95	0.170	1.5
4.45	0.390	0.6
3.95	0.891	0.3

El carbonato de calcio al disociarse en la solución del suelo deja libre al anión carbonato que reacciona con el agua formando bicarbonatos y generando OH⁻ que son quienes en definitivo neutralizan al aluminio. Son los carbonatos los que reaccionan con hidrogeniones, aumentando el pH de los suelos y no el calcio, sin embargo se da un intercambio de aluminio por calcio, el proceso requiere agua para que se dé la reacción. En cualquiera de las reacciones que se dé en el suelo, una mol de CaCO₃⁺, consume 2 moles de H⁺. El Ca⁺² al quedar en solución puede reaccionar con los coloides del suelo y aumentar la saturación de este catión en el complejo de cambio.

En la Figura 1 se puede observar cómo a medida que se adiciona cal a un suelo, este aumenta su pH y disminuye la concentración de aluminio.

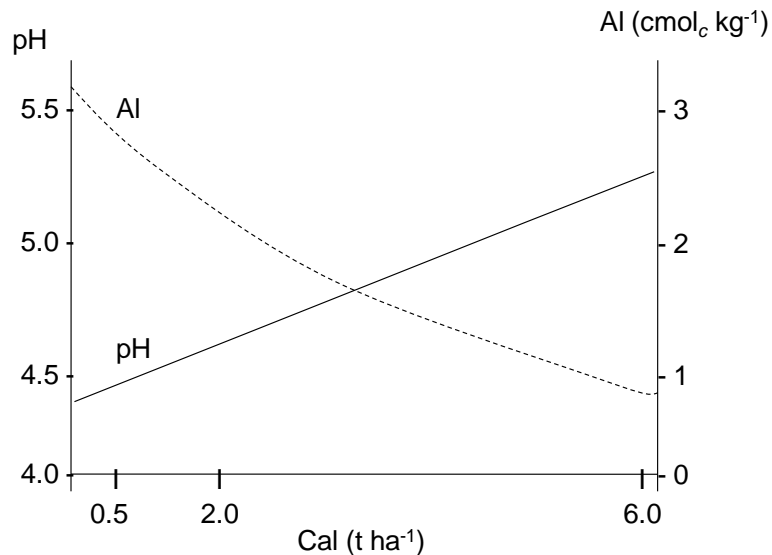


Figura 1. Efecto de la adición de cal sobre el pH del suelo y el contenido de Al intercambiable en un Oxisol de Carimagua, Colombia (Osorio, 2012, De Spain (1976)).

El yeso en la corrección de la acidez del suelo

El yeso ha sido usado por muchos años como un acondicionador y mejorador de suelos sódicos. Recientemente se ha visto su utilidad en el mejoramiento de suelos ácidos e infértiles como un corrector de la acidez del subsuelo, del encostramiento superficial y como fuente de calcio y azufre en los cultivos (Sumner, 1993). Se ha visto un notable incremento en rendimiento de los cultivos susceptibles a la acidez. La aplicación de yeso al suelo mejora el desarrollo de raíces y de esta forma, se puede aprovechar el agua y los nutrimentos del subsuelo, los cuales no eran disponibles para las plantas por la acidez de este. Como beneficios colaterales se ha visto un decrecimiento en la escorrentía superficial y la erosión.

El yeso no corrige la acidez de los suelos, sin embargo mejora los problemas asociados a este como las bajas concentraciones de calcio y los altos contenidos de aluminio, además se da un mejoramiento en las propiedades químicas por la aplicación de yeso, permite a las plantas soportar un mayor número de días bajo condiciones de estrés hídrico.

El yeso acidifica el suelo

La aplicación de yeso aunque contiene azufre no genera acidez a los suelos, solo ocurre cuando se suministra azufre elemental (flor de azufre). El yeso de mina o de síntesis química tiene un pH de 6.0-6.5 y la reacción que se sucede en el suelo puede cambiar solo 0.3 unidades de pH, es decir la reacción es casi neutra, a diferencia de cuando se aplica la flor de azufre o azufre elemental que si causa acidificación al reaccionar en la solución del suelo.

El aluminio

Aunque el Al^{3+} es considerado como un elemento no esencial y tóxico, se ha reportado que pequeñas concentraciones tienen efectos benéficos sobre las plantas. Se ha visto que una pequeña concentración de Al^{3+} tiene un efecto catalizador en la fotosíntesis, pero altas concentraciones flocculan las proteínas de las plantas y causan pérdida de calcio y potasio de las células dañadas.

El Al tóxico: ión libre o complejo de solvatación (Al^{+3} , $Al^{+3}(H_2O)_6$), en la solución del suelo:

- Inhibe el desarrollo de las raíces de las plantas y afecta negativamente el rendimiento de los cultivos, ver figuras 2 y 3, donde se puede observar como disminuye la longitud de las raíces, cuando se aumenta la concentración de aluminio.

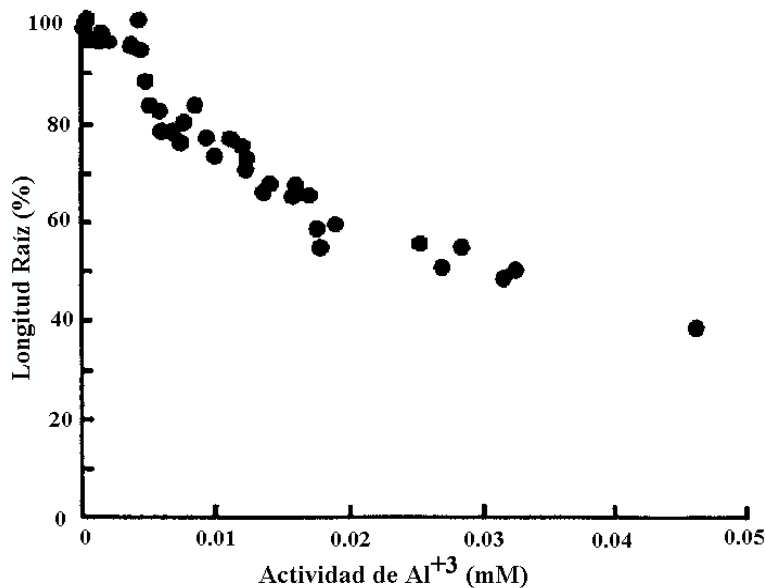


Figura 2. Efecto de la actividad del Al³⁺ en el crecimiento de raíces del café (Pavan y Bingham, 1982).

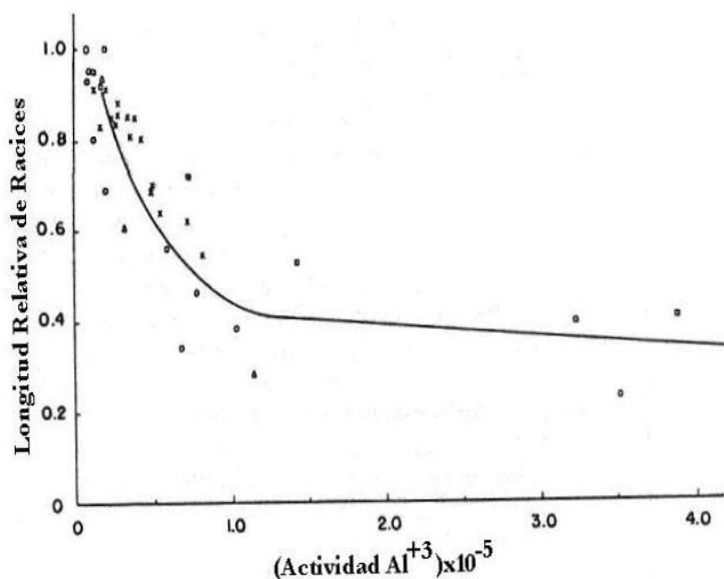


Figura 3. Relación entre la actividad del Al³⁺ en la solución del suelo y la longitud de la raíz primaria del algodón (Pearsons, 1971).

- Afectación depende de la tolerancia de la especie y la variedad a toxicidad del Al³⁺.
- Se ha reportado tolerancia en: Café, Trigo, arroz, tomate, soya, sorgo, pastos, maíz (Diferencias varietales), té, piña, yuca, banano, papa y otros cultivos.
- La toxicidad del Al³⁺ se observa principalmente en el sistema radical, causando una reducción del crecimiento y la muerte de los puntos de crecimiento.

-
- Las raíces laterales son más sensibles al daño que las raíces principales, aunque todas las raíces se dañan cuando se incrementan los niveles. Como resultado de esto, el sistema radical se hace muy ineficiente en la absorción de agua y nutrimentos.
 - Los síntomas de toxicidad en la parte aérea de las plantas son diversos y algunas veces no son fácilmente reconocibles. Esto se debe a que el Al interfiere en la absorción, transporte y uso de elementos esenciales tales como fósforo, potasio, calcio, magnesio y hierro.

La hidrólisis del aluminio es el encargado de producir iones H_3O^+ , siendo ambos negativos para el crecimiento normal de las raíces de las plantas. El Aluminio interfiere en la división celular de las raíces de las plantas, se da un crecimiento atrofiado y pobremente desarrollado. El aluminio es un elemento tóxico (Kamprath, 1970; Alvarado y Fallas, 2004) y afecta el rendimiento de los cultivos (Adams y Lund, 1966).

8 La cal aporta nutrientes

Generalmente cuando se requiere aportar nutrientes al suelo se piensa en aplicar fertilizantes o fuentes solubles de inmediata solubilidad para los cultivos, pero si tenemos suelos ácidos las cales o enmiendas aportan nutrientes en la medida que reaccionan, además se disocian el calcio y el magnesio quedando en la solución del suelo y la planta los puede tomar para nutrirse. Con una ventaja económica importante debido a que generalmente las cales cuestan de 3-4 veces menos que un fertilizante.

El pH es un factor dominante que regula la biodisponibilidad de nutrientes (Kemmitt *et al.*, 2006), al llevar los suelos ácidos a pH cercanos a 6 aumenta la disponibilidad de Ca, Mg, P, K, Fe, entre otros.

La cal (carbonato de calcio) al disociarse en la solución del suelo aporta calcio y si es Dolomita, además del calcio aporta magnesio.

En encalamiento ayuda a disminuir la capacidad de fijación de fósforo de suelos ácidos mediante la aplicación de enmiendas tales como cal y silicatos. Varios estudios con suelos ácidos en América tropical mostraron que al neutralizar el aluminio intercambiable mediante el encalamiento, disminuyó la fijación de fósforo (Kamprath, 1970).

De acuerdo a Sanchez y Salinas (2008) experimentos en suelos tropicales usando tratamientos con enmiendas disminuyeron la fijación de fósforo en aproximadamente un 20-30% de los tratamientos que no recibieron fósforo.

El encalamiento tiene poco o ningún efecto en la disminución de la fijación de fósforo en valores de pH de 5-6. Aunque siguen siendo ácidos, estos suelos presentan niveles de saturación de aluminio inferior al 45%. Además, el encalamiento a valores de pH cercanos o por encima de 7.0 puede aumentar en vez de disminuir la fijación de fosfatos

de calcio relativamente insolubles. En consecuencia, el efecto de la cal en la fijación de fósforo depende de los niveles de pH (Sanchez y Salinas, 2008).

En la figura 4 se puede observar cómo a medida que se aumenta el pH, se aumenta el contenido de fósforo hasta un pH alrededor de 5.5-6. Se aumenta el calcio y se disminuye la concentración de aluminio y manganeso.

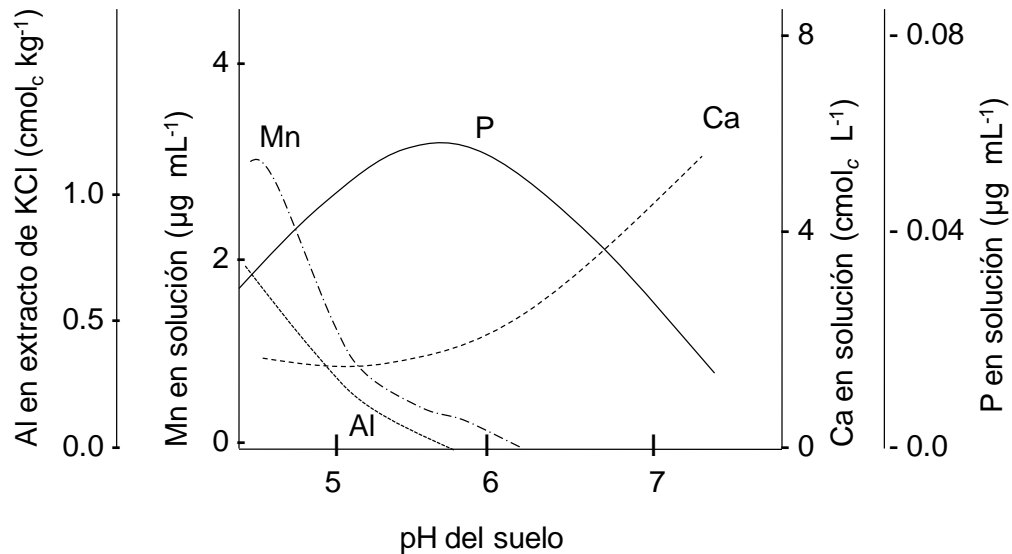


Figura 4. Cambios en los niveles de Al, Ca, P y Mn en extractos de saturación en función del pH del suelo establecido a través de la aplicación de cal en un Oxisol (Osorio, 2011)

Calcio

El calcio cumple funciones en las plantas como (Lindsay, 1979; Osorio, 2012):

- Forma parte de los compuestos que constituyen las paredes y mantiene las células unidas entre sí.
- Influye en la utilización de magnesio, potasio y boro y en el movimiento de los alimentos producidos por las hojas.
- Aumenta el vigor general de la planta y endurece los tallos.
- Está relacionado con la síntesis de proteínas que aumenta la absorción del nitrógeno en forma de nitrato.
- Estimula la producción de granos y semilla.

-
- El calcio juega un papel importante en la membrana y pared celular, actuando como barrera para la entrada de organismos causantes de enfermedades.

La disponibilidad del calcio guarda una correlación directa con el pH del suelo y bajo condiciones de acidez puede resultar limitante para producción (Fassbender, 1986).

El calcio contenido en los suelos, aparte de aquel añadido como medio encalador o en fertilizantes, provienen de las rocas o materiales de los cuales está formado el suelo, dolomita, calcita, apatita, feldespatos cálcicos y anfíboles. Estos minerales en el suelo van liberando gradualmente el calcio que contienen, pasando a la solución del suelo y de aquí a las plantas. La velocidad de liberación del calcio de los silicatos minerales primarios es relativamente lenta (Bermejo, 1980).

Este macroelemento no solo es indispensable para regenerar lo que se pierde por meteorización y cosechas, sino que en sus cales de caliza, cal viva, cal apagada, es indispensable como cal agrícola para corregir acidez del suelo. En Colombia se encuentra en tan grandes cantidades que es difícil cuantificar las reservas (Suescun, 1988).

Los abonos no suministran calcio garantizado como ingrediente principal, aun cuando es un componente de diversos materiales, especialmente de los superfosfatos. El calcio y el magnesio son denominados nutrientes secundarios y son tan esenciales por el crecimiento de la planta como los elementos primarios, nitrógeno, potasio y fósforo. El calcio es absorbido por las plantas en forma de iones Ca^{2+} el cual se encuentra en la solución del suelo y el complejo de intercambio del mismo.

A diferencia del potasio, el calcio no es fijado por los suelos o convertido a una forma lentamente disponible. El calcio del complejo de intercambio constituye la forma más fácilmente asequible del elemento. A valores del pH y de capacidad de intercambios bajos, menor es la cantidad de calcio intercambiada.

El calcio se suministra a los suelos, en su mayor parte, en forma de materiales de encalamiento, obtenidos de la caliza. La caliza se tritura y se calcina, obteniéndose la cal viva, de manejo cuidadoso debido a sus propiedades causticas. La cal viva se trata con agua, resultando un producto de más fácil manejo, llamado cal apagada. Otras veces la caliza se pulveriza en tamaños de partículas variados que pasen a través de tamices de 4, 8, 14, 28, 48 y 100 mallas, y el producto final está representado por porcentajes variados de estos tamaños de partículas. Así, los productos más gruesos de acción lenta suministran el calcio de un modo continuo, mientras que los tamaños menores reaccionan más rápidamente, neutralizando la acidez del suelo. La eficacia global de una caliza pulverizada está relacionada con su contenido de carbonato de calcio y la distribución porcentual de las partículas, determinado por tamizado (Bermejo, 1980).

Magnesio

El magnesio es uno de los nutrientes constituyentes de la clorofila importante en el proceso de fotosíntesis, es necesario para la activación del metabolismo de los carbohidratos y respiración de las células (Barrera, 1998). Además es importante en la época de llenado de los frutos. El magnesio junto con el calcio, potasio y sílice, genera en las plantas resistencia a varias enfermedades fungosas.

El magnesio no se presenta en forma elemental en la naturaleza, sino en combinación con otros elementos, especialmente en forma de carbonatos y silicatos, la presencia de este elemento en el suelo se origina de la meteorización de minerales tales como la Biotita, dolomita, augita, hornblenda, serpentina, olivino y talco. Los silicatos minerales complejos de magnesio son ligeramente hidrosolubles, mientras que los carbonatos se disuelven con alguna facilidad, los sulfatos y los cloruros son bastante solubles.

El magnesio es absorbido por las plantas en forma de catión Mg^{2+} . El magnesio está disponible para las plantas, en la solución del suelo y en forma cambiante. Estas dos formas están en equilibrio con el magnesio que queda lentamente disponible. La cantidad de magnesio que requieren las plantas es mucho menor que la del potasio, pero se aproxima a la del calcio. Se ha encontrado una relación calcio-magnesio en varias plantas, lo cual sugiere que debe haber un equilibrio en las aportaciones de estos dos elementos para un crecimiento óptimo (Cakmak y Kirkby, 2008).

Entre los abonos que suministran magnesio hay fuentes primarias de este elemento y hay otras en las cuales se presenta incidentemente, la dolomita, material empleado para neutralizar la acidez potencial de los fertilizantes mixtos así como también para corregir el pH del suelo, es la principal fuente de magnesio, ya que contiene cerca de 19.5% de MgO. La dolomita es un poco menos soluble que la calcita, por lo que se hace necesario reducir más el material antes de aplicarlo.

Otras fuentes importantes de magnesio son los sulfatos de magnesio y potasio, sal de Epsom, y dolomita calcinada. Muchos otros productos que no se consideran como fuente de magnesio, pero lo pueden aportar en menor cantidad junto con otros nutrientes (Cakmak y Yazici, 2010).

Azufre

El azufre es un elemento esencial para la vida vegetal, los requerimientos de azufre por los cultivos son relativamente bajos (Guerrero, 1998).

El azufre es requerido por las plantas, se absorbe por las raíces casi exclusivamente en la forma del ion sulfato. El azufre es requerido para las diferentes funciones fisiológicas en las plantas y mejora la calidad de las cosechas (Kanwar y Mudahar, 1986; Lora, 1986; Pasricha y Fox 1990).

Funciones fisiológicas:

- Síntesis de tres aminoácidos esenciales que contienen azufre: cistina, cisteína y metionina.
- Formación de la clorofila.
- Activación de ciertas enzimas proteolíticas.
- Síntesis de algunas vitaminas: biotina, tiamina, vitamina B1, glutatión y coenzima A.
- Formación de glúcidos, componentes esenciales de aceites.
- Formación de ciertas uniones disulfídicas, tales como el sulfhidrilo, imparte resistencia a la sequía y al frío.
- Formación de ferredoxina y de proteínas que contienen hierro que actúan como transportadores de electrones en el proceso fotosintético y que tienen que ver con la fijación simbiótica de nitrógeno.
- Activación de la sulfurilasa-ATP, una enzima que funciona en el metabolismo del azufre.

Calidad en las cosechas:

- Aumento de la calidad y cantidad de proteína en alimentos derivados de hortalizas, granos, tubérculos y raíces.
- Mejoramiento de la calidad en cereales para molinería y panificación.
- Incremento en el contenido de aceites en oleaginosas.
- Mejor calidad, olor, color verde y sabor de hortalizas.
- Limitante de los efectos adversos generados por la sequía y el frío en los cultivos.

Los requerimientos de azufre por los cultivos dependen de la especie, de los niveles de rendimientos o de la materia seca producida.

El azufre en Colombia se puede obtener de tres fuentes principales: de sulfuros, de crudos petrolíferos y de lavas volcánicas (Suescun, 1988).

Fósforo

El fósforo es un elemento esencial de los componentes químicos de las plantas, responsable de la transferencia de energía en los procesos metabólicos, durante el periodo inicial del desarrollo de la planta, lo mismo que durante la tuberización, se encuentra también en los ácidos nucleicos y es importante para la formación de semillas y el crecimiento de la raíz (Barrera, 1998). Favorece los fenómenos relacionados con la fecundación, formación y maduración de los frutos (Bermejo, 1980).

El fósforo es usado por las plantas en forma de fosfato, este es un macronutriente esencial para el desarrollo y crecimiento de las plantas (Narsian y Patel, 2000; Batti y Yamar, 2010; Singh y Reddy; 2011), desafortunadamente buena parte de los suelos colombianos presentan una baja disponibilidad de éste (IGAC, 1988; Jaramillo, 2011). Para aumentar su disponibilidad en el suelo es necesario aplicar altas cantidades de fertilizantes fosfóricos solubles (Narsian y Patel, 2000; Reddy et al., 2002). Una pequeña fracción del fosfato de los fertilizantes es utilizado por las plantas (5-10%) y el resto se fija en el suelo en formas insolubles (Engelstad y Terman, 1980; Vassileva et al., 2000; Osorio y Habte, 2009; Batti y Yamar, 2010). Este proceso es costoso, ineficiente y genera alto riesgo de contaminar aguas corrientes (Sahu y Jana, 2000; Arcand y Schneider, 2006; Shigaki et al., 2006).

La principal fuente de fosforo es la roca fosfórica. En Colombia este recurso se encuentra a lo largo de la cordillera Oriental, desde Sardinata en Norte de Santander hasta el sur del Huila, aflorando en numerosos sitios a lado y lado de sus vertientes. La roca fosfórica (RP) es un fertilizante fosfórico (Goenadi et al., 2000) poco soluble (Rajan et al., 1996; Reddy et al., 2002, Pramanik et al., 2009) y de baja efectividad agronómica (Vassileva et al., 2000); se usa como materia prima para la síntesis de fertilizantes más solubles (Reyes et al., 2001; Batti y Yamar, 2010)

Silicio

La presencia de Si aumenta la resistencia de las plantas al ataque de insectos-plagas y enfermedades, además, mantiene erectas las plantas evitando su caída (Datnoff, y Rutherford, 2003).

- Cuando se aplica en forma de silicato de magnesio al suelo, se logra neutralizar más hidrógenos (12H) causantes de la acidez que cualquier otra enmienda.
- Aporta ácido orto silícico que se fija al aluminio y al hierro y así estos no se fijan al ácido fosfórico, lo que implica menos pérdida de la fertilización fosfórica.
- La adición de silicio al suelo puede incluirse como una alternativa para el manejo integrado de enfermedades ya que, se ha comprobado que da resistencia a las plantas al ataque de enfermedades, disminuye el efecto negativo del aluminio, el hierro y el manganeso.

9 Diferencia entre fertilizantes y cales o enmiendas

Una cal o enmienda se aplica para corregir los problemas de acidez del suelo y adicional al proceso de corrección se nutre la planta con algunos elementos. Un fertilizante se aplica única y exclusivamente para nutrir la planta.

Generalmente las enmiendas no son solubles en agua y su contenido se mide solubilizándolo en ácido; en el suelo las enmiendas son reactivas en los ácidos del suelo como los ácidos carbónicos y en la acidez activa que él presenta. Las enmiendas se utilizan como equilibrantes de las bases especialmente calcio y magnesio. Los fertilizantes son solubles en agua. Las enmiendas solo se aplican al suelo, mientras que los fertilizantes pueden ser aplicados tanto al suelo como vía foliar.

Se puede aplicar un fertilizante sin haber aplicado antes una enmienda

Cuando un suelo es muy ácido, es decir, con pH muy bajo, muchos de los elementos nutricionales no se encuentran disponibles para la planta y al aplicar un fertilizante dichos elementos pueden ser fijados por iones como el aluminio formando complejos insolubles para ser tomados por la planta, luego, se pierde la acción del fertilizante, con el agravante de que los fertilizantes son más costosos que las enmiendas o cales.

Cuando se aplican enmiendas a un suelo ácido el objetivo es neutralizar principalmente la acidez del suelo, que en el trópico generalmente está dada por el Al^{+3} en la solución. Si se aplica por ejemplo un fertilizante fosfórico sin encalar, el fósforo es fijado o acomplejado por el aluminio y la planta no puede absorber el nutriente aplicado. La eficiencia de los fertilizantes es muy baja cuando la acidez del suelo es alta y esto hace que se incrementen los costos de producción. Cuando se aplican primero las enmiendas para bajar los porcentajes de saturación del aluminio en la solución del suelo se propicia un mejor ambiente para el crecimiento y desarrollo radical de las plantas que posteriormente podrán tomar el fertilizante aplicado de una forma más eficiente.

10 Yacimientos de cal en Colombia

Las reservas de cales en Colombia son tan abundantes que es difícil hacer una cuantificación. Están distribuidos en la región Andina, ubicadas principalmente en las cordilleras oriental, central y occidental. El mineral más común es la caliza, como resultados de la acumulación de sedimentos calcáreos marinos presentes en las tres cordilleras Andinas, pero su presentación como mármol (calizas metamórficas cristalinas) es frecuentísima y existen distritos amplios de calizas dolomíticas con contenidos hasta de 20% de magnesio.

Los yacimientos de cal en Colombia de acuerdo con Suescun (1988) son:

-
- Departamento de Antioquia: Los mayores yacimientos están en el piedemonte oriental de la cordillera central y el solo yacimiento de Nare cúbica más de mil millones de toneladas, este yacimiento tiene mármol dolomítico del paleozoico. Otras localidades antioqueñas ricas en calcáreos son: Amalfi (Dolomita), Segovia, Abejorral, Santa Bárbara, Cocorná, Urrao, Turbo, Frontino, Sonsón, Maceo, San Carlos (Donde se localizó la primera planta de cal agrícola).
 - Departamento del Atlántico: Las calizas del departamento del Atlántico son las más jóvenes del país, muy puras y cubren grandes extensiones explotables a cielo abierto. Se conocen cubicaciones parciales superiores a 2000 millones de toneladas. En Arroyo de Piedras, Atlántico se encuentran calizas del Eoceno Superior.
 - Departamento de Bolívar: Centenares de millones de toneladas de caliza con más de 93% de pureza se conocen en la colina de Albornoz, en Mamonal, Cartagena, otro poco en Turbaco, Bayunca y en el cerro de la Popa.
 - Departamento de Boyacá: Son calizas cretácicas de edad cretácea y existen en Nobsa, Tibasosa, Corrales, Cerniza, Moniquirá con purezas hasta del 97%.
 - Departamento de Caldas: Son yacimientos de edad paleozoica y se encuentran en los municipios de Filadelfia, Samaná, Dorada, Salamina, Pácora, la Victoria.
 - Departamento del Cauca: En los municipios de Pitayó, Corinto, existen grandes bancos explotables.
 - Departamento de Cesar: En Durania se han cubicado más de 2000 millones de toneladas de mármoles y caliza de hasta un 98% de pureza.
 - Departamento de Córdoba: En los alrededores de Montería existen millones de toneladas de calcáreos explotables a cielo abierto con purezas de hasta el 94%.
 - Departamento de Cundinamarca: grandes yacimientos se conocen en el Paramo de Sumapaz, en los municipios de Ubaté, La Calera, Gachalá, Pueblo Viejo, Apulo, pues toda la cordillera oriental es rica en calcáreos del cretáceo.
 - Departamento del Chocó: Sus principales yacimientos calcáreos están en Cabo Corrientes.
 - Departamento de La Guajira: En la Serranía de Perijá, vertiente occidental entre San Juan y Cuestecitas, se pueden cubicar más de 2000 millones de toneladas.

-
- Departamento del Huila: Es donde están los yacimientos más grandes de caliza cretácicas dolomítica, marmolizadas, blancas, en la localidad de la Lupa entre Neiva y Palermo, con contenidos de hasta el 34% de MgO.
 - Departamento del Magdalena: En fundación hay mármoles, y calizas dolomíticas que se explotan mínimamente.
 - Departamento del Meta: Calizas dolomíticas hay en Curamal, en Servitá y Currabal. En San Martín hay yacimientos dolomíticos de edad carboniana.
 - Departamentos Santanderes: El macizo de Santander tiene grandes yacimientos de calizas cretácicas en Mutiscua, Chinácota, en San Gil, Vélez, Curití, Tona.
 - Departamento de Sucre: Hay calizas del Eoceno Superior, acumulaciones del Terciario en Tolú viejo.
 - Departamento del Tolima: Los yacimientos calcáreos más conocidos y explotados son los de Payandé, Lérída, Líbano, Suarez y Chaparral, que están formadas por calizas cristalinas triásicas. Su estado cristalino se debe a las intrusiones cuarzo-monzoníticas del jurásico que afectaron no solo esta porción de la cordillera central sino también el área del macizo Santander.
 - Departamento del Valle: En la parte cordillerana su único yacimiento explotable es el de Vijes, pero en la Costa Pacífica posee en abundancia este recurso.

11 Geología de las cales

El origen de estos yacimientos calcáreos en Colombia se relaciona con acumulaciones del Paleozoico Superior, el triásico Superior y el Terciario (Manjarres, 1971).

En el Paleozoico superior sobre el área de la cordillera oriental se depositó una secuencia sedimentaria con participación notable de calizas, en la cordillera central se depositó una secuencia sedimentaria de lutitas, areniscas y calizas, luego estos materiales se trocaron en mármoles, cuarcitas, esquistos micáceos y hornbléndidos, además de ortoanfibolitas y diques de peridotita.

Al principio del Mesozoico, la geografía muestra un territorio limitado por un cinturón orogénico en la cordillera Central.

Durante el triásico superior el mar entra a la cordillera y se acumulan 400 metros de caliza sobre los sedimentos continentales que se derivan de la erosión del orógeno. Otros sedimentos continentales, clásticos y volcánicos, indican que el mar se retiró a consecuencia de nuevos movimientos a finales del Triásico.

Después de una invasión pasajera durante el jurásico inferior, culmina con la gran transgresión del Cretáceo. El mar de este tiempo se reparte en dos cuencas longitudinales separadas por el orógeno de la cordillera central ancestral. La cuenca occidental recibe sedimentos lúditicos y lavas diabásicas, que luego se incorporaron en la cordillera occidental. La cuenca oriental se llena de lutitas, areniscas, calizas y lúditas que cubren las rocas precretácicas de la cordillera oriental.

Las calizas cretácicas son macizas, grises y fosilíferas, con fósiles que indican un ambiente nerítico de deposición. La sedimentación cretácica no fue continua en toda su extensión. La regresión del Senoniano marca el final del cretácico y la iniciación de una sedimentación continental de procesos orogénicos en el comienzo del Terciario. La sedimentación Terciaria se traslada a la Llanura del Caribe. La cordillera oriental adquiere su arquitectura actual en ese tiempo y desde entonces ha venido sufriendo una denudación intensa. Esto explica el afloramiento en ella de los diferentes depósitos sedimentarios de calizas, y la naturaleza de las acumulaciones cuaternarias.

12 Como se produce la cal

Las cales para usos en la agricultura se procesan en plantas o industrias. Las fábricas de producción de cal son un conjunto de equipos reunidos, mediante los cuales el material calcáreo se extrae desde su yacimiento, se transporta hacia una trituradora de quijadas que disminuye el tamaño de las rocas a dimensiones más pequeñas aproximadamente entre 5-7 cm de diámetro, luego se transportan por un sinfín hacia un molino de martillos que muele la roca para ser transportada por un elevador de canjilones a unos tamices para ser clasificada, de tal manera que el producto que cumple con las especificaciones de calidad se pesa y empaca en sacos de 50kg.

Producción de cal en Colombia

Una vez definida la demanda potencial de la cal agrícola es necesario hallar yacimientos calcáreos que contengan la calidad requerida y la facilidad de una explotación económica.

Los yacimientos deben estudiarse bajo los aspectos de observación e inclinación de los mantos calcáreos, situación geográfica, alturas sobre el nivel del mar y las propiedades físicas, también se debe tener en cuenta las condiciones de drenaje natural del yacimiento para su explotación, así como los efectos que podrán tener obras actuales o futuras.

A las rocas se les debe analizar generalidades y características petrográficas para determinar el origen de las rocas, los contactos, las fallas, el estado cristalino, los tamaños de grano, el color, la dureza, la fragilidad y análisis químicos para determinar su composición.

Con lo anterior se llega a tener conocimiento de la forma, la extensión y el volumen del depósito del material disponible y explotable, luego es importante definir los frentes de ataques, la ubicación y el sistema de explotación (Calle, 1971).

13 Determinación de los requerimientos de cal

Como necesidad de encalado se entiende la cantidad de material de enmienda que se debe aplicar al suelo para producir una elevación a un determinado valor de pH.

Existen principalmente tres formas de determinar los requerimientos de cal:

La primera está basada en la tolerancia que exhiben las plantas a un nivel dado de Al^{3+} (expresado en términos de saturación de Al) que permite así calcular la cantidad de cal requerida para neutralizar el exceso de éste.

El segundo método consiste en incubar un suelo con cantidades crecientes de cal y al cabo de un tiempo breve (2-4 semanas) medir el pH; de ésta forma se conoce la relación entre cantidad de cal aplicada y el pH del suelo. Con base en esta relación se determina la cantidad de cal.

La tercera tiene en cuenta los niveles críticos y rangos adecuados definidos para cada cultivo específico, y se calcula la cantidad que se requiere para alcanzar el nivel adecuado conociendo la diferencia entre lo que aporta el suelo (en $cmolkg^{-1}$) y el valor ideal.

- Encalamiento basado en Al intercambiable

Cuando las especies iónicas de aluminio están presentes en la solución del suelo y el pH es <5.5 , éstas quedan disponibles para ser absorbidas por las raíces. Si la cantidad absorbida es muy alta, el Al interfiere en la división celular y, por ende, reducirá su crecimiento y desarrollo vegetal. Los síntomas de toxicidad por Al varían con cada especie vegetal, en general estos consisten en una fuerte reducción del crecimiento de la parte aérea y de las raíces primarias y laterales, la planta desarrollará clorosis y luego coloraciones púrpuras sobre las hojas (Osorio, 2012).

El Al intercambiable es uno de los mayores responsables de la acidez del suelo, parece lógico pensar que los requerimientos de cal de un suelo-cultivo sean determinados con respecto al valor de este elemento. En la Universidad de Carolina del Norte, Kamprath (1970) desarrolló una ecuación para calcular los requerimientos de calcio y luego de cal, así:

$$\text{Calcio requerido para encalar (cmolkg}^{-1}\text{)} = 1.5 \times Ali$$

Donde,

Ali ($cmolkg^{-1}$) = aluminio intercambiable extraído con KCl 1M.

En este caso las unidades del Sistema Internacional de Unidades se usan en vez de las unidades originales (meq/100 g suelo). Es necesario resaltar que en la ecuación original de Kamprath primero se calcula la cantidad de calcio (Ca^{2+}), para luego calcular la cantidad de cal requerida en la neutralización del Al^{3+} .

La propuesta de Kamprath ha sido ampliamente aceptada, desafortunadamente en algunas publicaciones ésta se ha modificado para calcular directamente los requerimientos de CaCO_3 ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$) y no los requerimientos de Ca^{2+} (cmolkg^{-1}) tal como se propuso originalmente. Esto pone en riesgo la fiabilidad de ésta aproximación. La ecuación modificada normalmente se presenta así:

$$\text{CaCO}_3 (\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}) = 1.5 \times \text{Ali}$$

La determinación del requerimiento de cal con ambas fórmulas coincide sólo si: (i) la densidad aparente del suelo es $1.0 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ y (ii) la profundidad es de 20 cm. Si esto no se cumple los resultados con la fórmula original serán distintos. Podemos tomar otro dato de profundidad para visualizar las diferencias, en este caso usemos una profundidad de 15 cm. Con la fórmula original se tiene el mismo requerimiento de calcio:

$$\text{Ca} (\text{cmolkg}^{-1}) = 1.5 \times 2.0 = 3.0 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Pero el cambio en la profundidad implica una mayor masa de suelo para encalar, de ahí que el segundo factor no sea 2.0×10^6 sino 1.5×10^6 . La modificación de 5 cm en la profundidad provoca una diferencia en el requerimiento de CaCO_3 entre la ecuación original y la ecuación modificada de 750 kg ha^{-1} . Lo recomendable es medir la densidad aparente del suelo y tener claro hasta que profundidad se desea encalar el suelo. La diferencia será más grande si además de una profundidad diferente a 20 cm se tiene una densidad aparente muy diferente a $1.0 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

- Incubación con Ca

Una forma de estimar los requerimientos de cal es a través de la incubación de muestras del suelo con cal (Uchida y Hue, 2000). Para tal fin, se toman porciones de suelo (20-50 g) que reciben la aplicación creciente de cal ($0-16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). Las muestras se someten a dos ciclos de secado y humedecimiento durante 15 días. Al cabo de este tiempo, se determina el pH de cada muestra. Es preferible utilizar $\text{Ca}(\text{OH})_2$ por su mayor reactividad, en vez del CaCO_3 ya que éste es poco reactivo y se requiere mucho más tiempo (~ 1 mes) para obtener lecturas estables del pH.

Los resultados se grafican y a partir del gráfico se puede extrapolar el requerimiento de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para alcanzar un pH deseado. Para neutralizar todo el Al^{3+} intercambiable es necesario llevar el pH a 5.5, si se desea neutralizar el Mn se debe obtener un pH de 6.0. Una vez se conoce el valor de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ se hace la transformación hasta obtener $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, para lo cual se requiere conocer la densidad aparente del suelo y el espesor del suelo que se desea encalar. Si se desea utilizar otra fuente de cal (p.e., CaCO_3) se hace la conversión molar.

La incubación es útil cuando se desea comparar la efectividad relativa de diferentes enmiendas en uno o más suelos de interés particular. Con este propósito las enmiendas se pueden aplicar al suelo y luego de cumplir un tiempo determinado de incubación, el suelo se analiza para establecer qué efectos se produjeron sobre él.

- Aplicación de cal basada en el pH del suelo

Cada especie vegetal crece mejor en un rango de pH determinado y el encalamiento es orientado a alcanzar ese valor. Generalmente se busca que con el encalado se alcancen valores cercanos a 5,5. Sin embargo, éste criterio puede ser inadecuado para muchos suelos del trópico en los cuales la alta capacidad buffer del suelo impide que la adición de cal cambie significativamente el pH. Esto se debe a la presencia de coloides orgánicos y minerales de carga variable dependiente del pH como sucede en Andisoles, Oxisoles y Ultisoles. En otras palabras, a pesar del encalamiento, el pH tiende a mantener un valor constante, o al menos, los cambios son muy pequeños. Se requiere una gran cantidad de cal para que haya un cambio del pH; estas cantidades pueden ser económicamente inadecuadas para los agricultores (Zapata, 2004, Osorno y Osorno, 2011).

Cuanta cal se debe aplicar

Uno de los principales problemas en el encalamiento es determinar los requerimientos de cal, es común escuchar que se aplican desde 500 kg/ha hasta 5000 kg/ha, como se puede apreciar es un rango demasiado amplio que no aplica por la gran variabilidad espacial del suelo, diferentes tipos de suelos (ordenes) y de cultivos, además, se corre el riesgo de un sobre encalamiento por tratar de aplicar dosis altas; Hay un concepto generalizado que para neutralizar 1cmolkg^{-1} de aluminio se requiere aplicar 1000 kg/ha de carbonato de calcio (CaCO_3) o para subir 0.1 grado de pH se requiere la misma dosis. Esto no es cierto o no aplica porque los suelos tienen diferente capacidad buffer, diferentes tipos y contenidos de arcillas, diferente grado de acidez, por ejemplo no es lo mismo aplicar cal a un Andisol que en un oxisol.

La necesidad de cal depende tanto de las propiedades del suelo como las propiedades y los requerimientos del cultivo. Dosis muy bajas no reducen la acidez de forma cuantificable y su efecto residual es casi nulo. Un análisis de suelo es la mejor herramienta para calcular una dosis adecuada. Con el encalado no solo se corregirá la acidez sino también se aumentarán la disponibilidad de algunos elementos. La cantidad de cal a aplicar dependerá del pH de suelo, del tipo de suelo, del tipo de cultivo, del aluminio intercambiable del suelo y la concentración crítica de nutrientes como Ca y Mg.

Para determinar las necesidades de cal se deben conocer 4 factores (Alvarado y Fallas, 2004):

- La tolerancia de la planta a la acidez.
- El contenido de acidez del suelo.

-
- La calidad del producto encalante a utilizar.
 - Los aspectos del manejo del producto involucrados en la aplicación del mismo (al voleo, en banda, incorporado entre otros).

Algunos autores como Lukin y Epplin (2003) han desarrollado ecuaciones y algoritmos para determinar las cantidades de cal que se deben aplicar, pero estas aproximaciones cambian con el tiempo y son específicas para el sitio de estudio.

Aplicación de cal

El método óptimo de aplicación es incorporar la cal en los primeros 15-20 cm del suelo utilizando un método de incorporación como el arado o la rastra. Sin embargo esto no puede lograrse siempre, debido a los altos costos que representa o que el cultivo ya este establecido como los perennes, por lo cual la cal se aplica entonces en la superficie del plato del árbol.

En cultivos perennes también resulta práctico incorporar un poco de cal en el hoyo de siembra antes de poner la planta y otro poco en la rodaja. Normalmente el suelo en el sitio de fertilización suele ser más ácido debido al efecto residual de los fertilizantes nitrogenados, por lo que la aplicación de cal en este sitio es una medida eficaz (Osorno y Osorno, 2011).

Época de aplicación de la cal

Cuando se tiene un proyecto de siembra o establecimiento de un cultivo, en el cronograma de actividades, debe estar presente el muestreo del suelo para hacer análisis químicos y físicos de este, de acuerdo a los resultados se evalúa si es o no necesario. Si el análisis del suelo comparado con el requerimiento del cultivo muestra que el suelo es más ácido de lo requerido, se debe aplicar una enmienda con un tiempo de 1-3 meses antes de la fecha de siembra, con el fin de incorporarlo y darle tiempo para que la enmienda reaccione y equilibre el suelo mejorando sus condiciones químicas.

La cal requiere humedad para poder reaccionar, la época más apropiada para aplicarla es a principio de las lluvias o un poco antes. Sin embargo no hay limitaciones en cuanto a la época de aplicación, siempre y cuando haya humedad en el suelo y que no coincida con el ciclo de fertilización del cultivo. En siembras nuevas la cal debe incorporarse antes de sembrar. Una vez aplicada la cal se debe esperar un tiempo prudencial de un mes para que reaccione, antes de añadir un fertilizante (Salamanca, 1999).

En cultivos perennes ya establecidos y en producción, se debe encalar después de la cosecha principal ya que el cultivo ha absorbido todos los nutrientes que el suelo y los fertilizantes aporta, mínimo cada dos años, para el sostenimiento y equilibrio de las bases, evitando la degradación del suelo que se empobrece por la extracción de nutrientes, por efecto de la acidez causada por los fertilizantes especialmente los

nitrogenados, por el lavado de calcio y magnesio por altas precipitaciones y por los procesos erosivos de malas prácticas culturales.

Duración del efecto de la cal

El efecto de la cal es muy variable y depende de la dosis de aplicación, del tipo de suelo (textura suelos arenosos retienen menos a diferencia de suelos mas arcillosos, capacidad buffer, entre mayor sea más difícil será modificar el pH del suelo), el clima (a mayor precipitación, menos duración del efecto), topografía (suelos con mayor pendiente son susceptibles a mayor lavado) y depende del tipo de cultivo (las leguminosas son exigentes en Ca, acidifican el suelo).

Los agricultores esperan que la cal tenga efecto residual; éste dependerá de diferentes factores como, el tipo de suelo, el tipo de cultivo, los requerimientos del cultivo, la precipitación, el relieve entre otras. El mejor método para conocer el efecto residual de la cal o de cualquier fertilizante es hacer análisis de suelos para conocer el comportamiento de estos en el suelo.

Generalmente se espera que los efectos benéficos del encalamiento de suelos ácidos duren varios años. Sin embargo, los efectos residuales por lo general duran menos en las regiones tropicales que en las templadas debido a la mayor precipitación y a las temperaturas más altas. La estimación de los efectos residuales de encalamiento de suelos ácidos es un factor primordial de manejo de suelos de bosques tropicales y de sabana. La duración del efecto residual también dependerá del ecosistema. En general los suelos ácidos en los bosques húmedos tropicales presentarán efectos residuales más cortos que la sabana debido a la liberación más rápida de aluminio de los complejos de materia orgánica y a la mayor remoción de bases por las plantas en sistemas anuales de producción de cultivos y quizás a mayores pérdidas por lixiviación en los bosques húmedos (Sánchez y Salinas, 2008).

Se puede aplicar cal de por vida?

Los suelos son dinámicos y tienden a acidificarse, además en la zona tropical por las condiciones de alta precipitación, arcillas tipo 1:1 de texturas franco arenosos, topografías con altas pendientes, químicamente con bajos contenidos de calcio y magnesio, por el uso intensivo y permanente de los cultivos que extraen los nutrientes, hacen que la práctica de encalamiento sea necesaria con ciclos de aplicación que puede ser de cada año o cada dos años, dependiendo del monitoreo mediante el análisis de suelos para no llegar al extremo de un sobre encalamiento.

14 Todos los cultivos necesitan cal?

Realmente los cultivos no son los que requieren cal, son los suelos ácidos los que hay que encalar, sin embargo la mayoría de las plantas requieren pH cercano a la

neutralidad, altas cantidades de elementos como el calcio, magnesio, fósforo entre otros para su funcionamiento y desarrollo y bajos contenidos de aluminio para evitar toxicidad. Aunque no todos los suelos necesitan encalamiento para los diferentes cultivos, los rendimientos de estos están muy influenciados por el pH del suelo (Lukin y Eppin, 2003) y los requerimientos de bases. Existen cultivos tolerantes a bajo pH o a alta saturación de aluminio.

Si un suelo ácido es encalado correctamente, este suelo puede alcanzar altos rendimientos en los cultivos como se puede observar en la figura 5, en un cultivo de soja donde al pasar de un pH de 5 a 6, el rendimiento del cultivo se duplica.

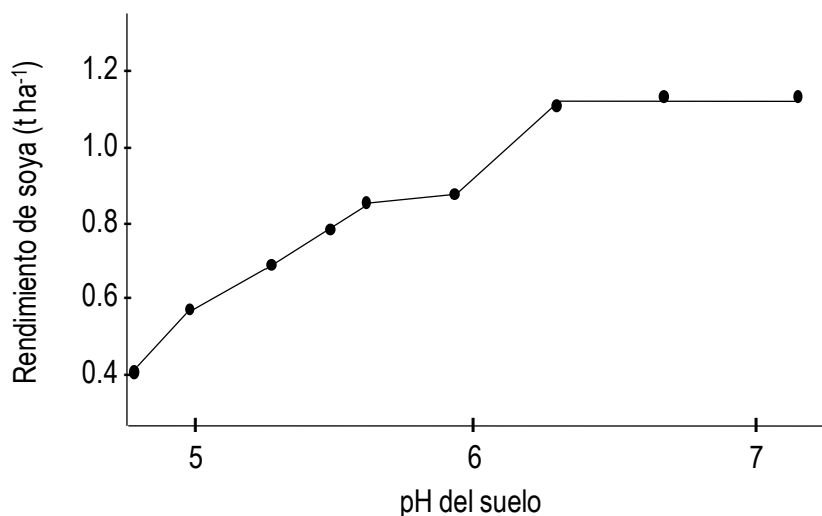


Figura 5. Rendimiento de granos de soja en función del pH del suelo establecido con encalamiento de un Oxisol (Osorio, 2012)

15 Todos los suelos necesitan cal?

En Colombia aproximadamente el 80% de los suelos son ácidos (Malagón, 2003), estos requieren un adecuado manejo para corregir o enmendar sus problemas oportunamente y de esta manera lograr cosechas exitosas.

La acidez del suelo, unido a la poca disponibilidad de nutrientes, es una de las mayores limitantes de la baja productividad de suelos ácidos. Aunque la acidificación es un proceso natural, la agricultura, la polución y otras actividades humanas aceleran este proceso (Hue, 2008). Debido al aumento de áreas acidificadas en el mundo y a la necesidad de producir más alimentos, es fundamental entender la acidez del suelo, con el fin de desarrollar prácticas de manejo (Zapata, 2004).

Dependiendo del suelo, del tipo de cultivo los suelos necesitan el uso de cales, para que algunos nutrientes estén disponibles, para neutralizar el aluminio.

El suelo contiene minerales y rocas que por acción de los agentes atmosféricos, factores físicos y químicos (lluvia, cambios de temperatura, la ruptura de raíces, el paso de

animales, horadación de lombrices, efectos antropológicos), empiezan a desintegrarse por un proceso llamado meteorización o intemperismo prolongado. Este proceso empobrece los suelos, se presentan carencias en K, Ca, Na y el Mg, que salen del primer horizonte del suelo y van a dar a los arroyos de aguas subterráneas o escorrentías y quedando un suelo residual de alúmina y óxidos de hierro, cada vez más ácido.

Al darse el proceso de meteorización es necesario volver a fertilizar los suelos para recomponer su contenido original de nutrientes (Suescun, 1988).

Jaramillo (2011) describe una clasificación taxonómica de suelos ácidos de acuerdo al sistema taxonómico americano (SSS, 1999, 2010). Los suelos ácidos se encuentran distribuidos en casi todos los órdenes del sistema. Sin embargo, hay algunos órdenes en los cuales son los suelos dominantes. Los suelos de los órdenes Oxisoles y Ultisoles (suelos tropicales típicos) agrupan solo suelos ácidos, los cuales se caracterizan por presentar:

- Evolución avanzada.
- Alta lixiviación de bases
- Bajo contenido de minerales meteorizables
- Predominio de sesquióxidos de Fe y Al
- Arcillas 1:1 en la fracción arcilla.

El orden de los Espodosoles también agrupan suelos ácidos originados por:

- Lixiviación de bases
- Procesos de eluviación- iluviación de materia orgánica
- Arcilla o sesquióxidos de Fe y Al
- Acumulación de materiales espondaicos.

Estos suelos se originan principalmente en climas húmedos y con materiales parentales muy permeables, con acumulación de materia orgánica pobre en nutrientes.

En Colombia los suelos ácidos más frecuentes se identifican mediante los siguientes elementos formativos:

- Inceptisoles: Hum, Dystr, al nivel de gran grupo. Aquandic, Cumilic, Humic, Histic, Plinthic, Andic, Oxic, Dystric, al nivel de subgrupo.

-
- Entisoles: Sulfic, Humaqueptic, Adic, al nivel se subgrupo.
 - Andisoles: la mayoría de ellos en el país son ácidos.
 - Alfisoles, Mollisoles y Vertisoles: en algunos se puede presentar suelos ligeramente ácidos a casi neutros como Kandi, Kanhapl, Umbr, Dystr, en gran grupo y Umbric, Histic, Plinthic, Andic, Ultic, Kandic, Alc, en subgrupos.
 - Histosoles: como se mencionó anteriormente, en este orden se agrupan los suelos orgánicos, los cuales son suelos ácidos.

A nivel de familia se definen algunos taxa cuyos suelos pueden presentar condiciones de acidez:

- Familias por clase mineralógica para ordenes diferentes a Oxisoles e Histosoles: Ferrítica, Gibbsítica, Oxídica, Halloysítica, Caolinítica y algunas Mezcladas.
- Familias por reacción: Ácida, Álica.

16 El uso de las cales o enmiendas en los suelos

La cal mejora el suelo?

Las cales pueden mejorar tanto las propiedades químicas, biológicas y físicas del suelo. Las cales pueden mejorar las propiedades químicas del suelo, aumentando la disponibilidad de nutrientes, al tener un pH cercano a la neutralidad se mejora la actividad de microorganismos y de meso organismos benéficos. Mejora las propiedades físicas del suelo como la agregación.

El mejoramiento del suelo influye directamente en el buen desarrollo y crecimiento de las plantas, para obtener cultivos y cosechas exitosas.

La cal mejora las propiedades químicas del suelo?

El encalado produce un aumento de iones OH^- y disminución de iones H^+ en la solución del suelo, disminución de la toxicidad por aluminio, manganeso y hierro, regulación de la disponibilidad de fósforo y molibdeno, aumento en la disponibilidad de calcio y magnesio, aumento del porcentaje de saturación de bases (Fassbender, 1986).

Las cales mejoran las propiedades físicas del suelo?

El uso de cales, yeso o enmiendas que contienen Ca y Mg flocculante pueden mejorar las propiedades físicas del suelo, mejoran el efecto de agregación. Al aumentar la

estabilidad de los agregados del suelo, se da la formación de enlaces fuertes que contienen Ca (Chan y Heenan, 1999; Cahplainetal *et al.*, 2011, Haynes y Naidu, 1998), la dispersión o floculación es óptima, mejoran la aireación y movimientos de agua (Fassbender, 1986). Las cales pueden mejorar la estabilización de suelos expansivos para la construcción (Seco *et al.*, 2011).

Efecto de las cales con los microorganismos del suelo

El pH tiene gran influencia sobre la microflora y microfauna presente en el suelo y su actividad.

En condiciones ácidas los cambios en la materia orgánica de los suelos, se produce como resultado de la actividad biológica de algunos hongos y actinomicetos. A medida que el pH aumenta, los hongos disminuyen y las bacterias aumentan, principalmente son importantes aquellas que fijan nitrógeno del aire y las que producen nitratos. Las bacterias viven y prefieren pH cercanos a la neutralidad para su desarrollo y actividad. Sin embargo a pH cercano a la neutralidad también se desarrollan bacterias patógenas para los cultivos como en el caso de la papa (Cales de Antioquia, 1979).

Efectos de las cales en la materia orgánica

El encalamiento mejora la mineralización de la materia orgánica, la velocidad de los procesos de amonificación y mineralización de compuestos sulfatados y fosforados son proporcionales al pH, y estos procesos ocurren mejor a pH cercano a la neutralidad (Fassbender, 1986).

La cal en la disminución de la toxicidad por aluminio

Primero, por el aumento del pH, los materiales encalantes son rocas ultra básicas que al ser aplicadas a suelos ácidos reaccionan neutralizando los iones H^+ de las distintas fuentes de acidez del suelo. Segundo, por complejación el efecto tóxico del aluminio es removido del suelo cuando se le adicionan bases fuertes de Lewis (SO_4^{-2} , PO_4^{-3} , $Si(OH)_4$, $-RCOO^-$). El carbonato de calcio al disociarse en la solución del suelo deja libre al anión carbonato que reacciona con el agua formando bicarbonatos y generando OH^- que son estos últimos los que neutralizan al Al^{+3} . Al aumentarse el pH disminuye la proporción del aluminio en la cubierta iónica (Zapata, 2004).

La cal en el control de los helechos

Los helechos se encuentran generalmente en suelos ácidos y se consideran como una planta indicadora de acidez (planta acidófila). Con la aplicación de cal se neutraliza la acidez, se aumenta el pH, es decir se cambian las condiciones químicas iniciales del suelo que favorecían el establecimiento de los helechos y por eso van desapareciendo.

La cal para control de enfermedades

La cal puede evitar diferentes enfermedades debido al aporte de nutrientes y aumento del pH. En palma de aceite se observan síntomas de pudrición de los tejidos en palmas jóvenes, causados por una sepa de hongo *Phytophthora palmivora*, cuando crecen en suelos ácidos y pobres de Ca, como lo revisa Laing (2010). Donde se demuestra que la pudrición del cogollo de palma de aceite puede ser controlado encalando el suelo, antes de la siembra.

El Ca hace parte de las pectinas (poligalacturonatos de Ca), las cuales confieren resistencia físico-mecánica a los tejidos. La mayoría de hongos y bacterias invaden el apoplasto mediante la liberación de enzimas pectolíticas. La actividad de estas enzimas es fuertemente inhibida por el Ca.

Deficiencias de Ca y bajos pH producen antracnosis en frijol, se mejora con la aplicación de carbonatos de calcio (Primavesi, 2002).

El Mg se encuentra en la lámina media y en la pared celular contribuyendo a dar resistencia físico-mecánica a la misma. Resistencia de frutales como el mango a parásitos como el abejorro serrador, son prevenidas y controladas con aplicaciones de enmiendas que contengan magnesio (Primavesi, 2002). El Mg es casi tan efectivo como el Ca en prevenir la desintegración de los tejidos, debido a bacterias causantes de pudriciones suaves.

El encalado previene hongos

La cal en polvo o la dolomita en polvo controlan hongos tipo *Oidium* spp de épocas calurosas. El encalamiento puede prevenir algunas especies de hongos al aumentar el pH del suelo (Baath y Anderson, 2003).

La cal repele los insectos

La cal no repele insectos, sin embargo cuando se usa cal viva esta puede matar insectos por ser cáustica. Por otro lado hay algunas comunidades de insectos que al modificar las condiciones del suelo migran disminuyendo la población como muchas familias de hormigas (Korenko *et al.*, 2008). Cal apagada a dosis muy bajas controla: Orugas, chinches, babosas, caracoles.

La cal con las lombrices del suelo

Cuando los valores de pH son muy bajos, la población de lombrices se reduce. Cuando estos suelos se encalan, se aumentan las cosechas y resulta mayor cantidad de materia orgánica que es el alimento de las lombrices, por lo tanto aumenta la población de estas y su actividad se multiplica (Cales de Antioquia, 1979).

La cal en la calidad del fruto

Altos contenidos de Ca en frutos carnosos disminuyen la incidencia de pudriciones durante el almacenamiento, como el aguacate de exportación que puede durar hasta 30 días debido al alto contenido de Ca. Concentraciones altas de Ca en el xilema (25mM) inhiben el desarrollo de *Fusarium* en tomate (Santos *et al.*, 1993).

Qué efectos tiene la cal con metales pesados?

Los metales pesados son tóxicos para las plantas. Las cales o enmiendas reducen el riesgo del daño causado por los estos (Anderson y Persson, 1988), al aumentarse el pH del suelo disminuye la disponibilidad de los metales pesados (Kiekens, 1984; Hooda y Alloway, 1996). Metales pesados como el níquel en bajas concentraciones pueden mejorar el crecimiento de las plantas, pero en altas concentraciones las consecuencias son deletéreas. Chen y Wong (2006) investigaron como se remediaba la contaminación de níquel en suelos cercanos a depósitos de minas mediante el encalamiento, permitiendo la siembra de *Agropyron elongatum*, mejorando tolerancia, crecimiento y rendimientos.

La cal en el compostaje

La cal se usa en el compostaje para evitar la proliferación de moscas, pero en realidad la cal se debe aplicar cuando el compostaje esté estable para mejorar el pH e incrementar los contenidos de calcio, magnesio, o mejorar las relaciones de las bases, también se pueden usar rocas fosfóricas para aumentar los contenidos de fosforo.

La cal puede mejorar una toxicidad por boro

Cuando se presenta una toxicidad por una mala dosificación en la aplicación de una fuente de boro como por ejemplo el bórax, se puede corregir mediante la aplicación de una cal (carbonato de calcio), que aumenta el pH del suelo y reacciona con el boro formando carbonatos de boro que son insolubles y así se disminuye la disponibilidad de éste (Restrepo, 2006).

La cal daña los suelos

La cal aplicada a los suelos ácidos que la necesitan en las dosis adecuadas de acuerdo a un estudio previo del suelo no causa daños al suelo. Un sobre-encalamiento si puede tener efectos no deseados al aumentar excesivamente el pH como consecuencia se insolubilizan muchos nutrientes y la planta no puede tomarlos (Osorio, 2012).

Efecto de las cales en suelos sulfato ácidos

La aplicación de cales en suelos sulfato ácidos pueden recuperar el suelo; se han hecho diferentes ensayos como los llevado a cabo por Gómez *et al.* (2000), en el Alto Chicamocha en Boyacá, donde se aplicó hidróxido de calcio y cal dolomita, los

resultados fueron el aumento del pH hasta en dos unidades, disminución en el contenido de sales y menor concentración del aluminio de cambio (menor a 1cmol respecto al suelo inicial). Combatt (1999) evaluó el efecto del encalamiento de suelos sulfato ácidos para el cultivo del algodón, donde se encontró que el encalamiento disminuye la acidez causada por la alta cantidad de sulfatos y aluminio intercambiable, aumentó la disponibilidad de nutrientes en el suelo y mayor absorción de estos (análisis foliares), el encalado mejoró el manejo y la rentabilidad del cultivo del algodón en suelos sulfato ácidos.

Efectos de la cal en suelos sódicos

En la recuperación de suelos sódicos implica la sustitución del sodio intercambiable por otro catión, la formación de una sal de sodio soluble con agua y el lavado de esta sal, normalmente el catión que reemplaza es el calcio.

En la recuperación de suelos sódicos se utiliza el yeso y el azufre elemental como correctivos químicos. La sustitución del sodio de la fase intercambiable del suelo mediante el empleo de yeso como correctivo conlleva a la formación de sulfato de sodio, sal que es desplazada mediante lavado, previo requerimiento de drenaje profundo (Castro, 1998).

La cantidad de enmienda de yeso a aplicar depende de la neutralización de saturación de sodio y tipo de textura (Coamo, 2001):

- Suelos arenosos (> 15% de arcilla,eficacia= 90-100%): 0.5 t.ha⁻¹
- Suelos francos (15-35% de arcilla, eficiencia= 70-80%) : 1.0 t.ha⁻¹
- Suelos arcillosos (36-60% de arcilla, eficiencia= 60-65%): 1.5 t.ha⁻¹
- Suelos muy arcillosos (> 60% de arcilla, eficiencia= 40-50%): 2.0 t.ha⁻¹

La cal quema?

No todas las cales queman, puede quemar el óxido de calcio o cal viva o también llamada cal brava, ya que es muy cáustica, reacciona rápidamente en contacto con el agua, provocando una reacción exotérmica.

Aplicaciones de cal viva en época de verano pueden causar efectos de deshidratación de las raíces ocasionando un marchitamiento del cultivo que los agricultores llaman “quemado por la cal”. Se debe tener en cuenta si se va a aplicar este tipo de cal hay que tener muchas precauciones; entre ellas, buen equipo de protección para el operario y aplicar e incorporar en época de lluvias con varios meses de anticipación antes de hacer las siembras.

17 Efectos del sobre-encalamiento

El sobre-encalamiento es la utilización de dosis mayores de cal de las necesarias para neutralizar el aluminio intercambiable que trae consecuencias negativas para el suelo y para el desempeño vegetal. Los rendimientos de los cultivos decaen con el sobre-encalamiento, como se observa en la figura 6. El rendimiento del cultivo aumenta hasta alcanzar un pH cercano a la neutralidad, luego a medida que se aumenta la dosis los rendimientos van cayendo.

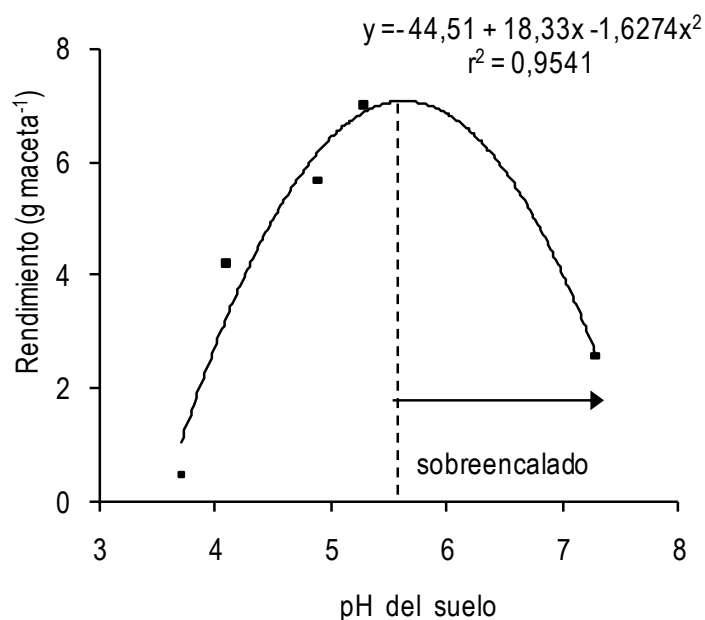


Figura 6. Efecto del pH de un suelo sulfato ácido (Typic Sulfaquept) encalado con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sobre el crecimiento de avena (Osorio, 2012)

El sobre-encalamiento, principalmente de suelos tropicales, oxisoles, ultisoles y andisoles, puede inducir (Fassbender, 1986; Alvarado *et al.*, 2010; Lora, 2010):

- Deficiencia de Zn, Mn, B y P y posiblemente de K al causar un desbalance de este elemento con Ca y Mg
- Reducción del rendimiento de los cultivos por afectarse funciones del suelo y de la planta.
- Deterioro de la estructura, se forman agregados más pequeños que reducen las tasas de infiltración y pueden favorecer la erosión.

-
- El aumento de la velocidad de descomposición de la materia orgánica del suelo, que acelera su pérdida.
 - Si se usa solo CaCO_3 , se reprime la absorción de magnesio a causa de la relación Ca/Mg.
 - Afecta adversamente la relación Ca/K y puede inducir deficiencias de K.

18 Lugares para la compra de las cales

Las cales o enmiendas se compran en los almacenes agropecuarios o directamente con empresas que las producen. Las cales deben estar debidamente empaçadas, selladas, rotuladas con la información de los contenidos mínimos garantizados en términos de óxidos, registro ICA, contenido neto del producto y el nombre de la empresa que lo produce.

De acuerdo con las normas técnicas colombianas NTC 40 (2003) el empaque, caja, paquete sirve para el transporte, almacenamiento, presentación, para protegerlo, identificarlo y facilitar dichas operaciones. Este empaque debe tener una etiqueta.

La etiqueta es una información adherida, adjunta o impresa directamente en el empaque y debe tener:

- El logo de la empresa
- El nombre del producto
- El grado de pureza
- Tipo de formulación
- Ámbito de uso agrícola
- Número de registro de venta
- Composición de nutrientes expresado en porcentaje en masa
- Fosforo asimilable (P_2O_5) o soluble en agua, de acuerdo a la NTC 234.
- Calcio expresado como óxido de calcio (CaO), de acuerdo a la NTC 1369
- Magnesio expresado como óxido de magnesio (MgO), de acuerdo a la NTC 1369.
- Azufre total expresado como elemento (S), de acuerdo a la NTC 1154.
- Los microorganismos se deben especificar en orden alfabético
- Peso neto (kg o g)
- Número del lote
- Fecha de formulación
- Destino de aplicación: suelo o foliar
- Recomendaciones de uso y manejo
- Observaciones importantes sobre: compatibilidad, fitotoxicidad, y recomendaciones a tener en cuenta en la mezcla y aplicación del producto.

19 Normas de calidad que deben cumplir las cales

Las calidades exigidas para las calizas dependen de los usos que se les den. Para la fabricación del cemento pueden usarse calcáreos con 78% de CaCO_3 y que tenga al menos 5% de MgO , el resto del material puede estar en forma de arcillas, sílice y compuestos de hierro. Para el uso agrícola la caliza debe ser más pura o tener un mayor porcentaje de magnesio, debe ser por lo menos del 80% de CaCO_3 .

La mayoría de las cales se vende de acuerdo a su composición química (Uribe, 1988):

- Contenido de óxido
- Contenido de óxido de Ca
- Poder neutralizante
- Porcentaje de calcio y magnesio

El control de calidad de las cales en Colombia está a cargo del Instituto Colombiano Agropecuario ICA, de acuerdo al decreto 843 de 1969 (reglamentación de los insumos agropecuarios), Resolución 000786 que hace relación a los fertilizantes, enmiendas y acondicionadores del suelo (tiene en cuenta las licencias de fabricas y productos) y las normas ICONTEC (Instituto Colombiano de normas Técnicas) que hacen referencia a estos productos: cal viva para enmiendas (producto proveniente de la calcinación de la caliza, con un contenido mínimo de 70% de CaO), cal apagada para enmiendas (Es el producto formado principalmente por el hidróxido de calcio Ca(OH)_2 , con un contenido mínimo de 52% de este compuesto), caliza para enmiendas (Producto natural formado principalmente por carbonato de calcio CaCO_3 con un contenido mínimo de 70% del mismo) y dolomita para enmiendas (producto formado por una mezcla natural de carbonato de calcio y carbonato de magnesio, con un contenido mínimo de 40% y 8% respectivamente). El ICONTEC regula desde la producción, el empaque, la etiqueta, la concentración, la forma de determinar las concentraciones entre otras, NTC 40, 234, 1369, 1154 etc.

20 Uso industrial de las cales

Desde la antigüedad los diferentes minerales encalantes han tenido diversos usos, especialmente en la construcción. Las cales tienen diferentes usos industriales, se usan en (Bateman, 1961; Dana, 1960):

- Como enmiendas y fertilizantes

-
- La cal se usa en la fabricación de cementos, se fabrica el cemento portland, que contiene 75% de caliza, 13% de sílice y 5% de alúmina.
 - La caliza se usa para la fabricación de cal para blanquear y para hacer tizas, vidrios, en construcción, como piedra de edificación (India), se usa en metalurgia, como fuentes en la extracción de menas metálicas, la caliza de grano fino es utilizado en litografía, La caliza se usa para la fabricación de elementos ópticos, la caliza se usa en Estados Unidos para purificar el agua, ya que precipita el CO₂, elimina la dureza permanente, producida por los sulfatos de magnesio y calcio, además se usa para el refinamiento de azúcar, como material refractario.
 - Los mármoles se utilizan como material de decoración y edificación
 - La cal magnesiana es un estuco resistente, duro y elástico.
 - La caliza se usa como piedra fundente en los hornos metalúrgicos, principalmente en los de hierros y metales no féreos. Sirve para separa la sílice y producir una escoria delgada y ácida que recoja y retenga las impurezas que se separan del metal.
 - La dolomita se usa como piedra de edificación y ornamentación, la dolomita apagada se usa para la fabricación de ladrillos de magnesia utilizados en los hornos básicos de solera, se usa en el proceso del sulfito en la fabricación del papel, para obtener una solución de bisulfitos de magnesio y calcio.
 - La magnesita se emplea como refractarios básicos, en la fabricación de ladrillos refractarios para hornos y para usar con materiales corrosivos y para la obtención de magnesio metálico. Se usa en la industria de la construcción, cemento, vidrio, cerámica, como abrasivo y en la industria de la metalurgia.
 - El yeso se usa para hacer molduras, construcción, enlucido de paredes, tejas.

21 Historia de la cal

La cal es un recurso cuyo uso fue generalizado en la época prehispanica, fundamentalmente como material de construcción (Barba y Córdova, 1999). La cal es uno de los materiales más nobles que ha utilizado el hombre desde los albores de la civilización. Los romanos, asirios, egipcios, y griegos explotaron al máximo sus cualidades como material de construcción. Pero a lo largo del tiempo sus aplicaciones se fueron multiplicando, apareciendo en industrias como la metalurgia, textil, agricultura, e incluso, en la medicina. (Palma, 2009). La teoría del encalado

se conoce desde principios del siglo XX, aunque no es sino a mitad del siglo que se retoma el tema y se definen claramente los factores que influyen en el cálculo de la necesidad del encalado.

E. BIBLIOGRAFÍA

Adams, F.; Z. F. Lund. 1966. Effect of chemical activity of soil solution aluminium on cotton root penetration of acid subsoil. *Soil Sci.* 101:193-198.

Aladesanwa R.; Akinbobola T. 2008. Effects of lime on the herbicidal efficacy of atrazine and yield response of maize (*Zea mays* L.) under field conditions in southwestern Nigeria. *Crop Protection* 27 pp. 926–931.

Andersson F. Persson T. 1988. Liming as a measure to improve soil and tree condition in areas affected by air pollution, National Swedish Environmental Protection Board, Report 3518, Solna, pp. 14–19.

Alvarado A, Molina E., Cabalceta, G. 2010. Acidez y encalado de suelos. *Tecnología de suelos: estudios de caso.* Universidad de Lleida. pp 69-99.

Alvarado A.; Falla J. 2004. La saturación de la acidez y el encalado sobre el crecimiento de la teca (*Tectona grandis* L.f) en suelos ácidos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 28(1), pp. 81-87.

Arcand, M.; Schneider, K. 2006. Plant and microbial based mechanisms to improve the agronomic effectiveness of phosphate rock: review. *Anais da Academia Brasileira de Ciências.* 78 pp. 791-807.

Baath, E., Anderson, T.H., 2003. Comparison of soil fungal/bacterial ratios in a pH gradient using physiological and PLFA-based techniques. *Soil Biology y Biochemistry* 35, 955–963.

Barba, L.; J. L. Córdova F. 1999. “Estudios energéticos de la producción de cal en tiempos teotihuacanos y sus implicaciones”, *Latin American Antiquity.* Vol. 10, Núm. 2, Washington.

Barber S. 1995. Soil nutrient bioavailable. Second Edition. John Wiley & Sons.

Barrera L. 1998. Fertilización del cultivo de la papa en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá. Fertilización de cultivos en clima fríos. Monómeros Colombo Venezolanos, segunda edición, pp. 63-83.

Batti. T.; Yamar, W. 2010. Bacterial solubilization of phosphorus from phosphate rock containing sulfur-mud. Hidrometallurgy 103pp. 54-59.

Bateman A. 1961. Yacimientos minerales de rendimiento económicos. Ediciones Omega, segunda impresión.

Basu M, Bhadoria P, Mahapatra C. 2008. Growth, nitrogen fixation, yield and kernel quality of peanut in response to lime, organic and inorganic fertilizer levels. Bioresource Technology 99 pp. 4675–4683.

Bejarano M.; Ordoñez R. 2000. Respuesta del cultivo de arroz a la aplicación de silicio en los llanos orientales. Tesis ingeniero agrónomo. Corporación Universitaria de ciencias aplicadas y ambientales. U.D.C.A. Bogotá, p 112.

Bermejo H. 1980. Los fertilizantes, su fabricación e importancia agrícola en Venezuela. Ediciones amon.

Bernal J. 2008. Pastos y forrajes tropicales. Manejos de praderas. Tomo 1. Bogotá. P. 204-208.

Biswas, P. Hosain, D. Ullah M, Akter N, Bhuiya, M. 2003. Performance of groundnut (*Arachis hypogaea* L.) under different levels of bradyrhizobial inoculums and nitrogen fertilizer. SAARC J. Agric. 1, pp. 61–68.

Bolan N, Curtin D.; Adriano D. 2005. Acidity. Elsevier Ltd. All Rights Reserved. Pp 11.

Caires C, Barth G, Garbuio F. Lime application in the establishment of a no-till system for grain crop production in Southern Brazil. *Soil y Tillage Research* 89 pp. 3–12.

Calle L. 1971. La cal Agrícola. Aspectos económicos. Primer coloquio de suelos. Sociedad Colombiana de las Ciencias del Suelo. Suelos ecuatoriales. Vol III, pp. 263-293.

Cales de Antioquia limitada. 1979. Traducción: Encalado agrícola, 100 preguntas y respuestas. National lime association. Primera edición. pp. 1-28

Cakmak I y Yazici A. 2010. Magnesium: A forgotten element in crop production. *Better crops*. 94(2): 23-25.

Cakmak I y Kirkby E. 2008. Role of magnesium in carbon partitioning and elevating photooxidative damage. *Physiol plant*. 133: 692-704.

Castro H. 1998. Fundamentos para el conocimiento y manejo de suelos agrícolas. Universidad pedagógica y tecnológica de Colombia. Programa de ingeniería agronómica. Ed. Produmedios. Bogotá. P 360.

Castro H.; Gómez M, 2008. Actualidad y uso de enmiendas calcáreas en Colombia. En: actualización en fertilización de cultivos y uso de fertilizantes. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. pp. 141-153.

Castro H.; Gómez M. 2010. Fertilidad de suelos y fertilizantes. Sociedad Colombiana de la Ciencia del suelo. Ciencia del suelo, principios básicos. pp. 77-137.

Chan, K.Y., Heenan, D.P., 1999. Lime-induced loss of soil organic carbon and effect on aggregate stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63, 1841– 1844.

Chaplain; V Défossez P, Delarue D, Estrade J, Dexter e A, Richard G, Tessier T. 2011. Impact of lime and mineral fertilizers on mechanical strength for various soil pHs. *Geoderma* 167-168 pp. 360–368.

Chen Q.; Wong J. 2006. Growth of *Agropyron elongatum* in a simulated nickel contaminated soil with lime stabilization. *Science of the Total Environment* 366 pp. 448– 455.

Combatt E. 1999. Efecto del encalamiento en un suelo sulfatado ácido y respuesta del cultivo del algodónero (*Gossipium hisutum*) y sorgo (*Sorgum bicolor*) a nivel de invernadero. *Revista temas agrarios*, Vol 4 N 7. pp. 73-85.

Dana Hurlbut. 1960. *Manual de mineralogía*. Editorial Reverté pp. 334-345.

Datnoff L y Rutherford B. 2003. Accumulation of silicon by Bermudagrass to enhance disease suppression of leaf spot and melting out. *USGA Turgrass and environmental research online* 2 (18) 1-6

Engelstad. O.; Terman. G. 1980. Agronomic effectiveness of phosphate fertilizer. In: Khasawneh. F., Sample. E., Kamprath. E. (eds). *The role of the phosphorus in agriculture*. Soil Science Society. Madison. WI. pp. 311-332.

Fassbender H. 1986. *Química de suelos. Con énfasis en suelos de América Latina*. Instituto Interamericano de cooperación para la agricultura. San José, Costa Rica. Primera edición.

Espinosa J. 2003. Encalados de suelos tropicales. En: *manejo integral de la fertilidad del suelo*. Sociedad Colombiana de la Ciencias del suelo. Bogotá.

Espinosa J y Molina E. 1999. *Acidez y encalado de los suelos*. Instituto de la potasa y el fosforo-INPOFOS. Primera edición. 39p

García B.; Pantojal C. 1998. Fertilización del cultivo de la papa en el departamento de Nariño. Fertilización de cultivos en clima fríos. Monómeros Colombo Venezolanos, segunda edición, pp. 23-42.

Goenadi. D., Siswanto., Sugiarto. Y. 2000. Bioactivation of Poorly Soluble Phosphate Rocks with a Phosphorus-Solubilizing Fungus. Soil Science Society of America. 64 pp. 927-932.

Gyaneshwar. P., Kumar. V., Parekh. L, Poole. S. 2002. Role of soil microorganisms in improving P nutrition of plants. Plant and Soil 245 pp. 83-93.

Gómez M, Bello F, Contreras P, Castro H. 2000. Recuperación de suelos sulfatados ácidos en área de distrito de riego del Alto Chicamocha (Boyacá). X Congreso de las ciencias del suelo. Medellín Octubre 11-13. 2000. pp. 33-34.

Guerrero 1991. Fertilización en cultivos en climas cálidos. Tercera edición EMA. Barranquilla Colombia. pp. 47-67.

Guerrero R. 1998, La fertilización con azufre para el cultivo de la papa en Colombia. Fertilización de cultivos en clima fríos. Monómeros Colombo Venezolanos, segunda edición, pp. 87-102.

Haynes, R.J., Naidu, R., 1998. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. Nutr. Cycl. Agroecosyst. 51, 123- 137.

Hooda P, Alloway B. 1996. The effect of liming on heavy metal concentrations in wheat, carrots and spinach. J Agric Sci Cambridge; 127: 289- 94.

Hue N. 2008. Development, Impacts and Management of Soil Acidity in Hawaii. Department of Tropical Plant and Soil Sciences, College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii at Manoa, HI 96822, USA.

IGAC, 1988. Instituto geográfico Agustín Codazzi. Suelos y bosques de Colombia. Bogotá. pp. 135

IGAC, 2003. Instituto geográfico Agustín Codazzi. Mapa de suelos de Colombia (Escala 1:500). Memorias. Bogotá.

Jaramillo, D. 2011. El suelo: origen, propiedades, espacialidad. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

Jayasinghearachchi. H.; Seneviratne. G. 2006. Fungal solubilization of rock phosphate is enhanced by forming fungal-rhizobial biofilms. *Soil Biology y Biochemistry*. 38 pp. 405-408.

Kanwar J.; Mudahas M. 1986. Fertilizer sulfur and food production. Dordrecht. Martinus Nijhoff. P. 247.

Kamprath E.; Smyth T. 2005. LIMING. North Carolina State University, Raleigh, NC, USA. Elsevier Ltd. All Rights Reserved. pp. 350-380.

Kamprath, E. 1970. Exchangeable aluminum as a criterion for liming leached mineral soils. *Soil Sci.Soc. Am. Proc.*, 34: 252- 254.

Kemmitt S, Wrighta D, Gouldingb K, Jones D. 2006. pH regulation of carbon and nitrogen dynamics in two agricultural soils. *Soil Biology y Biochemistry* 38 pp. 898–911

Kiekens L. 1984. Behaviour of heavy metals in soils. In: Berglund S, Davis RD, Hermite PL, editors. *Utilization of sewage sludge on land: rates of application and long-term effects of metals*. Dordrecht D. Reidel; pp. 126–34.

Korenko S, Kula E, Holec M, Jarab M, Michalkova V. 2008. Influence of liming on the epigeic spider (Araneae) community of the Krusne hory Mts. (Czech Republic). *European journal of soil biology* 44. pp. 559 – 566.

Laing D. 2010. La Causa de la Pudrición de Cogollo en la Palma de Aceite (PC): Evidencias del Rol del Calcio en una Hipótesis Abiótica. XII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo, Santo Domingo Ecuador en noviembre 2010.

León A. 1988. Características físico-químicas de las rocas fosfóricas naturales y modificadas para aplicación directa al suelo. Fuentes inorgánicas naturales en el manejo de suelos y fertilización de cultivos. Sociedad Colombiana de las ciencias del suelo. Comité Regional Antioquia. pp. 19-31.

Leon A. 1999. Capacidad de intercambio catiónico y química de las bases del suelo. Cursos sobre suelos con aplicación en palma de aceite. Cenipalma. pp. 43-50.

Lindsay W. 2001. Chemical equilibria in soil. Ed. John Wiley and sons.

Lin F.; Clemency C. 1981. The dissolution kinetics of magnesium silicates. Geochim Cosmochim Acta 36; 35-50.

Lora R. 1986. Caracterización y disponibilidad de azufre en algunos suelos de Colombia. Fuentes inorgánicas naturales en el manejo de suelos y fertilización de cultivos. Sociedad Colombiana de las ciencias del suelo. Comité Regional Antioquia. pp. 77-88.

Lora R. 2010. Propiedades químicas del suelo. Sociedad Colombiana de la Ciencia del suelo. Ciencia del suelo, principios básicos. P 77-137.

Lukin V.; Epplin F. 2003. Optimal frequency and quantity of agricultural lime applications. Agricultural Systems 76 pp 949-967

Malagón Castro, D. 2003. Ensayo sobre tipología de suelos colombianos -Énfasis en génesis y aspectos ambientales- Rev. Acad. Colomb. Cienc. 27(104): 319-341.

Manjarrez G. La cal Agrícola en Colombia. Parte I. Aspectos geológicos. Acidez y Encalamiento en el trópico. Primer coloquio de suelos. Sociedad Colombiana de las Ciencias del Suelo. Suelos ecuatoriales. Vol III, pp. 254-262.

Martínez A. 1988. Uso potencial de reservas de fósforo. El caso Colombia. Fuentes inorgánicas naturales en el manejo de suelos y fertilización de cultivos. Sociedad Colombiana de las ciencias del suelo. Comité Regional Antioquia. pp. 13-18.

Molina E. 1998. Encalado para corrección de la acidez del suelo. Asociación costarricense de la ciencia del suelo. San José de Costa Rica. 45 p.

Motavalli P. Palm A, Parton J, Elliott T and Frey D. 1996. soil pH and organic c dynamics in tropical forest soils: evidence from laboratory and simulation studies. Soil Biol. Biochem. Vol. 27, No. 12, pp. 1589-1599.

Narsian. V.; Patel. 2000. H. *Aspergillus aculeatus* as a rock phosphate solubilizer. Soil Biology y Biochemistry 32 pp. 559-565.

NTC 32. 2011. Tejido de alambre de tamices para propósito de ensayos. ICONTEC.

NTC 40. 2003. Fertilizantes y acondicionadores del suelo. Etiquetado. ICONTEC.

NTC.163. Abonos o fertilizantes. Cal agrícola para enmiendas. ICONTEC.

NTC 234. 1996. Abonos y fertilizantes. Método de ensayo para la determinación cuantitativa del fósforo. ICONTEC

NTC 326. 2001. Abonos o fertilizantes. Métodos de ensayo de granulometría en seco. ICONTEC.

NTC 1369. 1998. Fertilizantes. Determinación de zinc, cobre, hierro, manganeso, calcio, y magnesio por absorción atómica. ICONTEC:

NTC 4801. 2000. Productos químicos básicos para la industria Agrícola. Silicatos de magnesio para uso agrícola. ICONTEC.

Osorio. W. 2012. Manejo de Nutrientes en Suelos del Trópico. ISBN: 978-958-44-9746-8. In print.

Osorio. N.W.; Habte M. 2009. Strategies for utilizing arbuscular mycorrhizal fungi and phosphate-solubilizing microorganisms for enhanced phosphate uptake and grow of plants in the soils of the tropics. En: Microbial Strategies for Crop Improvement. pp. 325-351.

Osorio N.W.; Pérez J.C. 2000. Microbial solubilization of phosphates in soils. A review. En: Uso de microorganismos en la agricultura, materia orgánica mito o realidad memorias del X Congreso de la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo pp. 103-116p.

Osorno H y Osorno L. 2011. Determinación de los requerimientos de cal. Suelos Ecuatoriales. 41(1): 29-35.

Palma L V. 2009. Historia de la producción de cal en el norte de la cuenca de México. Centro Universitario Tenancingo Universidad Autónoma del Estado de México, México. CI ENCIA ergo sum, Vol . 1 6-3. pp.. 227 – 234

Parsicha N.; Fox R. 1990. Plant nutrient sulphur in the tropics and subtropics. Advances in agronomy. 50: 209-269.

Pavan, M. y f.T. Bingham. (1982). Toxicity of aluminium seedling to coffee grown in nutrient solution. Soil Sc. Soc. Am. J.46: 993-997.

Pearson, W.R. 1971. Problemas de acidez en el subsuelo. Soc. Col. Ciencia del Suelo. Suelos Ecuatoriales, Vol. III. (1):294-308.

Pramanik P, Bhattacharya S, Bhattacharyya P, Banik P. 2009. Phosphorus solubilization from rock phosphate in presence of vermicompost in Aqualfs. *Geoderma* 152 pp.16-22.

Primavesi A. 2002. La nutrición y la enfermedad en las plantas. Memorias del seminario Manejo ecológico del suelo tropical. Santafé de Bogotá, febrero del 26 -28.

Ramírez, C.A. 2005. Aislamiento y evaluación de rizobacterias con potencial biocontrolador y promotor de crecimiento en plantas de banano. Tesis (Maestría en Biotecnología) Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia (Medellín). pp. 169.

Ramos M.; Boddey R. 1987. Yield and nodulation of *Phaseolus vulgaris* and the competitiveness of an introduced *Rhizobium* strain: Effects of lime, mulch and repeated cropping Original Research Article *Soil Biology and Biochemistry*, Volume 19, Issue 2, 1987, Pages 171-177.

Raij V. B. 2008. Gesso na agricultura. Instituto agrônomico de Campinas.

Rajan. S., Watkinson. J.H., Sinclair. A.G. 1996. Phosphate Rocks for Direct Application to Soils. *Advances in Agronomy*. 57 pp. 77-159.

RAE 2001. Real academia española. 22^a edición. <http://buscon.rae.es/draeI/>

Reddy. S., Kumar. S., Babita. K. 2002. Biosolubilization of poorly soluble rock phosphates by *Aspergillus tubigenis* and *Aspergillus niger*. *Bioresource Technology* 84 pp 187-189.

Reyes. I., Baziramakenga. L., Bernier. H., Antoun. H. 2001. Solubilization of phosphate rocks and minerals by a wild-type strain and two UV-induced mutants of *Penicillium rugulosum*. *Soil Biology and Biochemistry* 33 pp 1741-1747.

Restrepo F. 2006. Evaluación de la respuesta del café (*Coffea arabica* L.) a la fertilización con boro en un andisol del suroeste antioqueño. Tesis de maestría en ciencias, geomorfología y suelos, Universidad Nacional de Colombia.

Richardson A, Henderson P, James G, Simpson G. 1988. Consequences of soil acidity and the effect of lime on the nodulation of *Trifolium subterraneum* L. Growing in an acid soil. *Soil Biology and Biochemistry*, Volume 20, Issue 4, Pages 439-445.

Robarge, W.P., Johnson, D.W., 1992. The effects of acidic deposition on forested soils. *Adv. Agronomy* 47, 1-83.

Sahu. S.; Jana. B. 2000. Enhanced of the fertilizer value of rock phosphate engineered through phosphate-solubilizing bacteria. *Ecological engineering* 15 pp 27-39.

Salamanca R. 1999. *Suelos y fertilizantes*. Universidad Santo Tomas. Editorial Usta. pp.258-268.

Sadeghian S. 2008. Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia. *Guia practica. Boletin técnico* No 32. Cenicafe.

Salas R, Smyth J, Alpizar D, Boniche J, Alvarado A, Rivera A. 2002. Corrección de la acidez del suelo con Ca y Mg y su efecto en el desarrollo del sistema radical del palmito en la etapa de previvero. *Agronomía Constarricense* 26(2), pp. 87-94.

Sánchez F.; Owen E. 1994. Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos en los llanos orientales de Colombia. *Fertilidad de suelos, diagnóstico y control*. Sociedad Colombiana de la Ciencias del suelo. Bogotá. P 345-402.

Sanchez P. Salinas J. 2008. *Suelos ácidos. Estrategias para su manejo con bajos insumos en America tropical*. Sociedad Colombiana de las Ciencias del suelo. pp. 41-45.

Santos J, Lopes, C, Lima, J.1993. Cultivares de tomateiro diferenciadoras de racas de *Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici*. *Horticultura Brasileira*, Brasilia, v.11, n.1, p.27-29.

Seco A. Ramírez F, Miqueleiz L, García B. 2011. Stabilization of expansive soils for use in construction. *Applied Clay Science* 51 pp. 348-352

Schreffler A.; Sharpe W, 2003. Effects of lime, fertilizer, and herbicide on forest soil and soil solution chemistry, hardwood regeneration, and hardwood growth following shelterwood harvest. *Forest Ecology and Management* 177 471–484.

Scott, B.; Fisher, J. 1989. Selection of genotypes tolerant to aluminium and manganese. In: A.D. Robson (Ed), *Soil Acidity and Plant Growth*, pp. 167–203. Academic Press, Australia.

Shigaki. F., Sharpley. A., Prochnow. L. 2006. Animal-based agriculture, phosphorus management and water quality in Brazil: options for the future. *Science Agric.* 63 pp 194-209.

Sigh. H.; Reddy. M. 2011. Effect of inoculation with phosphate solubilizing fungus on growth and nutrient uptake of wheat and maize plants fertilized with rock phosphate in alkaline soils. *European Journal of soil Biology* 47 pp 30-34.

Sociedad Colombiana de la ciencia del suelo. 2001. Los elementos secundarios (Ca, Mg, S) y el silicio en la agricultura.

Sumner, M. E. 1993. Gypsum and acid soils: The world Scene. *Adv. in Agron.* 51:1-32

Suescun D. 1988. Recursos minerales para enmiendas y fertilizantes en Colombia. Fuentes inorgánicas naturales en el manejo de suelos y fertilización de cultivos. *Sociedad Colombiana de las ciencias del suelo. Comité Regional Antioquia.* pp.. 47-54.

Tobón J.; León L. 1971. Comparación de varios métodos para determinar requerimientos de cal en algunos suelos Colombianos. *Suelos ecuatoriales. Acidez y enclamiento en el trópico.* Vol 11 N 1, pp. 66-100.

Uchida, R.; N.V. Hue. 2000. Soil acidity and liming. p. 101-111. In J.A. Silva and R.S. Uchida (ed.) *Plant nutrient management in Hawaii's soils: Approaches for tropical and subtropical agriculture.* CTAHR, Univ. of Hawaii at Manoa, Honolulu.

Uirbe R. 1988. Control de calidad de las cales para uso agrícola. Acidez y Encalamiento en el trópico. Primer coloquio de suelos. Sociedad Colombiana de las Ciencias del Suelo. Suelos ecuatoriales. Vol III, pp. 244-251.

Vassilev. N.; Vassileva. M. 2003. Biotechnological solubilization of rock phosphate on media containing agro-industrial waste. *Appl Microbiol Biotechnol* 61 pp 435–440.

Vassileva. M., Azcon. R., Barea. J., Vassilev. N. 2000. Rock phosphate solubilization by free and encapsulated cells of *Yarrowia lipolytica*. *Process Biochemistry* 35 pp. 693-697.

Whitelaw, M.A. 2000. Growth promotion of plants inoculated with phosphate solubilizing fungi. *Advances in Agronomy* 69 pp. 99-151.

Xiao. C., Chi. R., Huang. X., Zhang. W., Qiu. G., Wang. D. 2008. Optimization for phosphate solubilization by phosphate-solubilizing fungi isolated from phosphate mines. *Ecological Engineering*. 33 pp. 187-193.

Xue1 D, Huang X, Yao H, Huang C. 2010. Effect of lime application on microbial community in acidic tea orchard soils in comparison with those in wasteland and forest soils. *Journal of Environmental Sciences*, 22(8) 1253–1260.

Zapata R. 2004. Química de la acidez del suelo. Corrección de la toxicidad por aluminio en el suelo. Primera Edición. pp. 125-175.