FACTORES QUE AFECTAN LA APROVECHABILIDAD DE LOS NUTRIMENTOS N, P, K, Ca y Mg PARA LAS PLANTAS* S89(03)

Rodrigo Muñoz Araque**

I. INTRODUCCION

Las plantas absorben elementos minerales indiscriminadamente del medio que rodea las raíces, pero la presencia en la planta de un elemento en particular no constituye prueba de su esenciabilidad. La disponibilidad de los elementos esenciales para los cultivos depende de factores individuales o combinados del clima, suelo y planta. En este artículo se hace referencia a los principales factores que afectan la aprovechabilidad del N, P, K, Ca y Mg en suelos colombianos.

Criterios de esenciabilidad de los elementos.

Las plantas para su crecimiento y desarrollo requieren 16 elementos que se han dividido en macro y micronutrimentos. Los primeros se necesitan en mayor cantidad y los micronutrimentos en cantidades muy pequeñas.

Para establecer la esenciabilidad de un elemento Arnon, citado por Tisdale y Nelson (41), estableció los siguientes principios:

- La deficiencia de un elemento hace imposible que la planta complete el estado vegetativo o reproductivo, durante su vida.
- Los síntomas de deficiencia del elemento solamente se pueden corregir o prevenir al aplicar tal elemento.
- El elemento participa directamente en la nutrición de las plantas independientemente de su posible efecto en corregir alguna deficiencia química o microbiológica en el suelo o en el medio de crecimiento.

Los elementos esenciales.

En la siguiente lista se presentan los dos grupos de elementos y la forma como son absorbidos preferentemente por la planta. Entre paréntesis se indica la reacción del suelo para mejor absorción.

Macronutrimentos	Carbono	CO_2, HCO_3^-
	Oxígeno	H_2O, oxígeno gaseoso, diversos aniones.
	Hidrógeno	H_2O, diversos aniones
	Nitrógeno	NO_3^-, NH_4^+ (ácido)
	Fósforo	$H_2PO_4^-$ (ácido); $HPO_4^{=}$ (neutro y alcalino)

* Trabajo presentado en el Curso de "Conceptos básicos sobre Suelos y Fertilizantes", para técnicos de Abocol y Monómeros Colombo-Venezolanos, llevado a cabo en Palmira, Septiembre 16-21, 1974.

** I.A., M.S. del Programa de Suelos del Centro Experimental Palmira, Apartado Aéreo 233, Palmira.

	Potasio	-	K^+ (alcalino)
	Calcio	-	Ca^{++} (alcalino)
	Magnesio	-	Mg^{++} (alcalino)
	Azufre	-	$SO_4^=$ (alcalino
	Hierro	-	Fe^{++}, Fe^{+} (ácido)
	Manganeso	-	Mn^{++} (ácido)
	Zinc	-	Zn^{++} (ácido)
Micronutrimentos	Cobre	-	Cu^{++} (ácido)
	Boro	-	$BO_3^=$, $HBO_3^=$, $H_2BO_3^-$ (ácido)
	Molibdeno	-	$MoO_4^=$ (alcalino)
	Cloro	-	Cl^-

Nota: Tomado de Perdomo y Colaboradores (35).

Las hojas absorben el dióxido de carbono (CO_2) del aire, el cual a través de la fotosíntesis es convertido en carbohidratos. Las raíces absorben los elementos minerales y el agua del suelo.

Además de los elementos mencionados existen otros que se encuentran en algunos vegetales en cantidades significativas y que benefician su crecimiento, pero que aún no se ha comprobado su esenciabilidad para la mayoría de las plantas; tales como son: sodio (Na) en la remolacha; silicio (Si) en caña de azúcar, arroz y diversas gramíneas. Aluminio (Al), en cereales. Algunos investigadores sospechan que también se necesita cobalto (Co), vanadio (V), estroncio, yodo, galeo, germanio, fluor, lo cual se podrá comprobar a medida que se perfeccionen los sistemas de análisis.

Factores que afectan la aprovechabilidad de los nutrimentos.

Los factores que afectan la disponibilidad de los nutrimentos son diferentes de acuerdo al elemento, al suelo, al medio y a la planta. No obstante el pH, contenido de M.O., CIC, óxidos hidratados de Fe y Al, carbonatos de Ca y Mg, interacciones, temperatura y humedad son factores más o menos comunes a todos los nutrimentos.

De acuerdo con Alexander (1), el nitrógeno de la capa arable de los suelos está combinado en forma orgánica y solo una fracción muy pequeña, del orden del 0.5 al 3.0% del N-total se mineraliza por acción microbial. En la mineralización del N intervienen muchos factores pero entre los más sobresalientes están:

1) La cantidad y clase de materia orgánica.

2) El estado de los nutrimentos.

3) pH.

4) Contenido de humedad y aireación.

5) Minerales arcillosos amorfos.

6) Formación de compuestos específicos Al-Humus.

En Colombia, la información sobre los mecanismos que determinan la mineralización del nitrógeno es escasa. Sin embargo, existen resultados para suelos de los departamentos de Nariño, Caldas, Risaralda, Antioquia, Sabana de Bogotá y Valle del Cauca que hacen referencia a algunos de esos mecanismos. Así, De Benavides)10), en suelos derivados de cenizas volcánicas de Nariño, Caldas, Risaralda y Antioquia, cuyas características aparecen en la Tabla 1, encontró que: 1) La materia orgánica y de nitrógeno total de estos suelos no son un índice adecuado de la aprovechabilidad del nitrógeno, y con base en ellos no se puede recomendar una fertilización nitrogenada, sin riesgo de equivocarse; 2) La tasa de mineralización da una mejor base para recomendar prácticas de fertilización. En los diferentes suelos la tasa de mineralización es muy variable e independiente de un patrón general de las condiciones físico-químicas prevalentes. No obstante, en los suelos de Piedras Blancas y Pasto, la acción individual o combinada de un conjunto de condiciones como contenidos muy bajos de P aprovechable y bases de cambio, especialmente de calcio y magnesio son, posiblemente, los responsables del bajo poder de mineralización. En los demás suelos, el grado de mineralización es moderado, con excepción de las localidades Letras y Paraguaisito en donde puede considerarse alto. En estos suelos, según la prueba de Fieldes, para alofana, no contienen este mineral amorfo. Es importante anotar en los datos de la Tabla 1, que la tasa de mineralización es independiente del contenido de aluminio intercambiable y de arcillas, limos y arenas (textura); y 3) El encalamiento, variando de 0 hasta 700 me. de $CaCO_3$/100 g. de suelo, aumenta ligeramente la mineralización del N, pero la cantidad es tan baja que no compensa los gastos de encalamiento. Resultados similares con encalamiento obtuvo Blasco (2), en suelos del trópico húmedo del Putumayo. En estos suelos, ácidos, pobres en P y en bases intercambiables, la aplicación de 1% de $CaCO_3$ y una variación en la temperatura de incubación de 15 a 30 grados centígrados mejoraron ligeramente la mineralización del nitrógeno. Este incremento fue provocado por el aumento en la tasa de amonificación, ya que la nitrificación no varió (Tabla 2).

Las posibles explicaciones que se dan a los resultados de la Tabla 2, según Blasco (2), son: el calcio tiende a retardar la descomposición de los materiales orgánicos al reaccionar con las sistencias húmicas para formar humatos de calcio de lenta descomposición. En relación a la temperatura, parece que la amonificación por cuanto es dependiente de microorganismos heterotróficos, en cierto grado termofílicos, es favorecida por el incremento de aquella.

Lora (21), con suelos de varias regiones frías de Colombia obtuvo resultados similares a los de Benavides (10) y Blasco (2) en cuanto al efecto de la cal y la temperatura sobre la producción de nitratos. En resumen Lora (21), encontró: 1) Un coeficiente de correlación positivo altamente significativo entre producción de nitratos y temperatura de incubación. En algunos suelos, la producción de nitratos fue de 0 partes por millón, cuando la temperatura era de 5 grados centígrados (Tabla 3), lo cual explica en parte la respuesta a la aplicación de nitrógeno en algunos suelos de páramo, de elevado contenido de materia orgánica; 2) El encalamiento mostró una correlación altamente significativa entre la producción de nitratos y los niveles de $CaCO_3$, en 5

TABLA 1. Características físico-químicas y sus efectos en el grado de mineralización del nitrógeno de varios suelos colombianos (De Benavides, 10).

Suelo	pH	Saturación bases %	P_2O_5 kg/Ha	C %	N-total %	C/N	Al me/100 g	Arcillas %	Grado de mineralización %
Piedras Blancas Antioquia	5,9	0,4	0	6,4	0,65	10,0	-	14,6	0,15
Chachaquí-Nariño	5,5	57,6	4	2,9	0,38	7,7	0,21	25,0	0,21
Nariño-Pasto	5,3	3,5	2	9,4	0,71	13,4	0,31	44,1	0,66
Ipiales-Nariño	5,2	11,0	0	8,4	0,64	13,2	0,40	37,0	1,39
Sta Rosa-Risaralda	5,7	44,7	16	5,2	0,59	8,8	0,32	31,1	1,52
Naranjal-Caldas	5,2	48,9	34	5,7	0,74	7,7	0,54	18,8	1,78
Paraguasito-Caldas	5,7	53,7	22	3,9	0,50	8,3	0,21	14,5	2,26
Letras-Caldas	5,3	56,6	9	5,1	0,51	10,0	1,13	5,9	2,57

TABLA 2. Producciones promedias de N NH_3 y N-NO_3 en suelos del Putumayo (Colombia) con y sin adiciones de $CaCO_3$. Incubaciones a 15 y 30 grados centígrados (0,3 bares). Resultados en partes por millón (ppm) (Blasco, 2).

Temperatura °C.	Incubación semanas	N - NH_3 Sin $CaCO_3$	N - NH_3 1% $CaCO_3$	N - NO_3 Sin $CaCO_3$	N - NO_3 1% $CaCO_3$
15	3	62	65	8	8
15	6	76	84	9	8
15	12	86	102	8	10
30	3	78	127	10	9
30	6	109	133	8	6
30	12	134	158	8	8

de 10 suelos estudiados. En esos suelos, el contenido de materia orgánica era alto y el de calcio y magnesio relativamente bajo. En general, de acuerdo con Lora (21), el efecto benéfico del $CaCO_3$ se debió, posiblemente, al aumento del pH, a la adición del calcio como nutrimento y a la disponibilidad de algunos elementos nutritivos. En Obando, el efecto negativo del $CaCO_3$ en la nitrificación podría haberse presentado por la formación de humatos de calcio y a un efecto negativo sobre la población nitrificadora tanto en su población como actividad; y 3) En condiciones de invernadero con maíz, Lora (21), obtuvo una correlación positiva, altamente significativa, entre la producción de nitratos de varios suelos y el nitrógeno o nitratos extraído por el maíz. Es decir, que cuando la temperatura del suelo no restringe la nitrificación, la capacidad de producción de nitratos del suelo como técnica de laboratorio, para predecir respuestas a nitrógeno, parece ser bastante promisoria.

La rata de descomposición de materiales adicionados al suelo depende, en gran parte, de la relación C/N. Cuando esta relación es mayor de 25-27/1 es de esperarse una reducción en la mineralización del nitrógeno, debido especialmente a la inhibición de la actividad de la proteinasa por efecto de los carbohidratos (Blasco, citado por Lora 6). En estudios realizados por Blasco (2), en suelos del Valle del Cauca, para observar la mineralización del nitrógeno, a través del sistema nitrógeno-celulosa, encontró: 1) Una drástica reducción del $N\text{-}NH_4$, $N\text{-}NO_3$ y mineralización del N cuando se adicionaba a los suelos 1% de celulosa (Tabla 4). Según Blasco (2), en base a estos resultados, cuando se agregan a los suelos del Valle del Cauca, residuos de cosechas altos en compuestos celulósicos o similares, de lenta biodegradabilidad, se puede producir una inmovilización del nitrógeno del suelo. En estos casos es recomendable adicionar un fertilizante nitrogenado que equilibre el déficit de la mineralización. Este fenómeno, tal como se observa en la Tabla 4, es más acentuado en aquellos suelos salinos o salino sódicos, como los de Palmaseca.

La aireación y la humedad son dos factores que están íntimamente ligados. En general, los organismos nitrificantes son más sensibles al exceso de humedad que a la falta de agua. Se ha establecido que puede ocurrir una buena nitrificación cuando el contenido de humedad del suelo es aproximadamente de 1/3 a 2/3 de la capacidad de campo (Alexander, 1).

En suelos bien aireados la descomposición de la materia orgánica es más intensa que en los suelos inundados, debido a la gran liberación de energía que acompaña a la respiración de los organismos aeróbicos. En estas condiciones, el proceso de degradación de los materiales orgánicos avanza hasta la formación de NO_3. En cambio, en suelos inundados el proceso de amonificación es de mayor intensidad que el de nitrificación (Sánchez, 38).

En suelos del Valle del Cauca, Blasco (3) estudió la evolución del CO_2 bajo diferentes tensiones de humedad. En este trabajo se encontró

TABLA 3. Relación entre la producción de nitratos y la temperatura de incubación de algunos suelos de clima frío en Colombia (Lora, 21).

Localidad	Nitratos (ppm) 5oC.	10oC.	15oC.	20oC.	Coeficiente correlación
Ldderas Cumbal	0	27	33=	45	0,96**
San J rge-Cundinamarca	0	11	22	32	0,99**
Serie Techo	23	19	23	37	0,77
La Cocha-Nariño	15	116	128	129	0,83*
Valle de Cuachucal	46	104	162	246	0,99**
Obonuco-Pasto	3	123	130	180	0,93**
Cabrera-Cogua	0	12	22	61	0,94**
Cabrera-Cruz Verde	0	23	30	61	0,97**
Río Bogotá	20	33	34	54	0,95**
Tibaitatá	3	19	31	65	0,97**

TABLA 4. N-mineral acumulado en suelo del Valle del Cauca incubados, con y sin adición de celulosa, durante 3 y 6 semanas (30oC, 0.3 bares). Resultado 5 en ppm (Blasco, 2).

Suelos	N-mineral	N- mineral acumulado (a)			
		tres semanas		Seis semanas	
		Sin celulosa	1%	Sin celulosa	1%
Palmira	12,9	52,1	2,0	62,5	10,4
Villarica	22,8	68,2	13,0	84,5	6,9
Jamundí	30,9	70,7	38,7	117,1	15,1
Cerritos	14,7	124,5	64,7	144,1	36,4
Palmaseca*	12,2	1,7	3,2	12,1	3,2
Palmaseca*	9,1	2,2	0,7	25,1	8,7
Risaralda	15,0	132,9	42,7	157,3	6,3
Buenaventura	15,3	65,4	6,4	82,9	7,4

* Palmaseca salino
** Palmaseca salino sódico
(a) Las cantidades de N-mineral acumulado deben sumarse ( ) o restarse ( ), a la columna original.

que la evolución de CO_2 se incrementaba más rápidamente en los niveles iniciales de humedad en comparación a las tensiones de humedad próximas al punto de saturación. Pero la velocidad de producción de CO_2 fue siempre mayor en contenidos de humedad entre 50 y 100% de la máxima capacidad de retención de agua. Blasco (3), considera que en condiciones de tensiones de humedad próxima a 0 (cerca de 100% de máxima capacidad de saturación), la producción de nitrógeno es principalmente como $N\text{-}NH_4$. En condiciones de anegamiento se puede producir asimilación microbial del NH_3.

Las deficiencias de nitrógeno, en Colombia, son de ocurrencia común en la mayoría de los cultivos, especialmente en los trópicos. El clima juega un papel importante en el contenido de nitrógeno del suelo. En climas calurosos y húmedos el contenido de nitrógeno es mucho más bajo que en los suelos de clima frío en donde hay acumulación de materia orgánica. Se exceptúan aquellos casos en donde por erosión la capa superficial del suelo ha sido removida o en los suelos de origen aluvial de formación reciente.

En los suelos de las regiones calurosas y húmedas pueden encontrarse altos niveles de nitrógeno, como una consecuencia de condiciones de mal drenaje (aireación pobre) que ha impedido la descomposición de la materia orgánica. Los manglares de Nariño en la Costa del Pacífico, son suelos con un alto contenido de materia orgánica y por consiguiente de nitrógeno. En términos generales el contenido de nitrógeno en los suelos colombianos varía en proporción directa a la altura sobre el nivel del mar o en proporción inversa a la temperatura (26).

El Fósforo.

El fósforo presente en el suelo se puede perder por erosión, fijación, inmovilización por los microorganismos y remoción por las cosechas (Lotero, 23). Bajo condiciones de buen manejo y conservación de suelos, la cantidad de fósforo que se pierde por erosión puede considerarse muy baja. En Colombia, los estudios existentes indican que la principal forma de pérdida del fósforo ocurre por fijación. Sin embargo, se puede considerar que ésta no es una pérdida absoluta, ya que con el tiempo, y bajo ciertas condiciones, el fósforo fijado puede llegar a ser aprovechable para las plantas, al menos en forma parcial.

El fósforo es fijado en el suelo en diferentes formas y el conocimiento de este fenómeno es indispensable para un buen uso de fertilizantes fosfatados. Algunos investigadores han explicado los principales mecanismos que determinan la fijación del fósforo. Según Madrid citado por Lotero (23) la fijación del fósforo en los suelos tropicales parece depender principalmente de la presencia de los óxidos de hierro y aluminio. Datos recientes presentados por León (18) para Colombia, sugieren que la fijación del fósforo puede depender, en gran parte, de la presencia de caolinita, vermiculita-clorita interestratificada y los óxidos de Fe que revisten la caolinita son los principales responsables de la fijación del fósforo en los suelos Inceptisoles, Ultisoles y Oxisoles de los Llanos Orientales y en los suelos Andosoles de

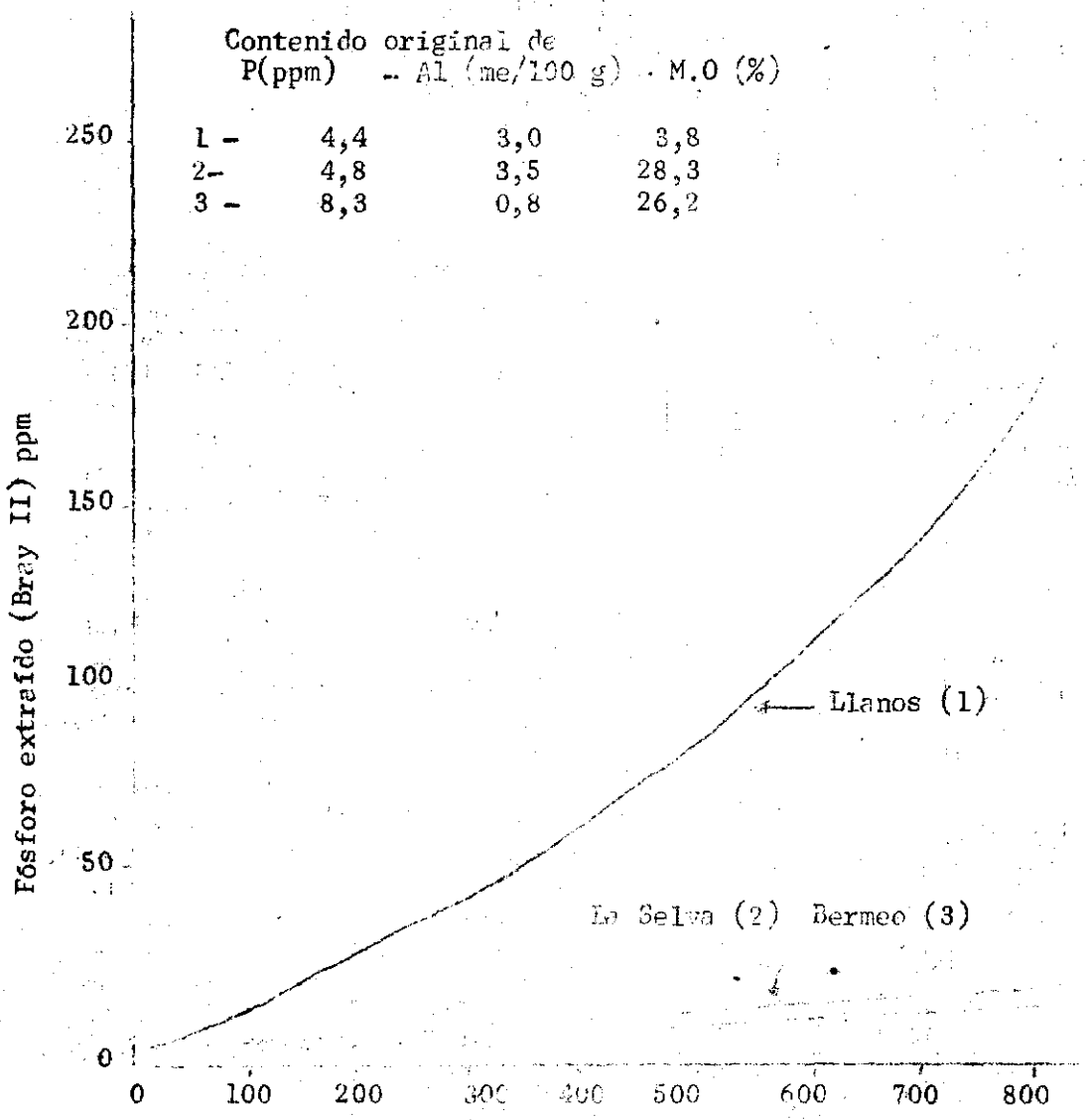


FIGURA 1. Capacidad de fijación de P de 3 suelos colombianos (Sanchez, 89).

la Selva-Antioquia, la alófana y el aluminio ligado a la materia orgánica. En estos suelos se han presentado fijaciones de hasta 800 partes por millón. Esta alta capacidad de fijación de fósforo fue confirmada por Monsalve y Lotero (19), quienes no encontraron respuesta al efecto residual de aplicaciones tan altas como 1800 kilogramos por hectárea de P_2O_5.

En la Figura 1, se observan los resultados sobre capacidad de fijación del fósforo obtenidos por Sánchez (39), en suelos ácidos-Tropept-de La Libertad en los Llanos Orientales; Humitropept-ándico de la serie Bermeo, en la Sabana de Bogotá y Dystrandept de La Selva-Antioquia. En esta figura se observa que los suelos de Bermeo y La Selva tienen una alta capacidad de fijación de fósforo, mientras que el suelo de La Libertad, la fijación es menor.

En el suelo de La Libertad, los posibles principales componentes responsables de la fijación del fósforo serían el aluminio-intercambiable (3,01 me/100 g); la vermiculita-clorita, los óxidos de Fe^{+++} que revisten la caolinita y la goetita (León, 18). Benavides (5), indica que cuando se aplica fósforo a los suelos de los Llanos Orientales, el fosfato se combina principalmente como fosfato de aluminio, luego como fosfato de Fe^{+++} y solamente en menor cantidad como fosfato de calcio. En el suelo de Bermeo y La Selva la fijación del fósforo se debería, principalmente, al alto contenido de materiales amorfos en la fracción arcillosa-alófano y al aluminio ligado a la materia orgánica (León, 18).

Sánchez (39), al estudiar la influencia de distintos niveles de Ca - Mg como carbonatos y de Escorias de Alto Horno (Silicato de calcio, finamente molido con 33,5% de SiO_3 y 43% de CaO) sobre la liberación del fósforo encontró que las dosis de 1 a 2 me/100 g de Ca - Mg y de 5 a 10t/Ha de Escorias disminuían la fijación del fósforo aplicado y del nativo, en los suelos de La Libertad, Serie Bermeo y La Selva. A niveles más altos de Escorias y Carbonatos de Ca y Mg se incrementaba la fijación del fósforo nativo y del aplicado debido, posiblemente, a la formación de compuestos de Ca-P insolubles.

Burbano y Mafla (6), en un trabajo similar al de Sánchez (39), con suelos del altiplano de Pasto, Putumayo y de la Costa Pacífica Nariñense encontraron que los efectos más sobresalientes del encalamiento ($CaCO_3$) eran: 1) Incfemento de la fijación del fósforo aplicado hacia las formas de P-Ca no apatítico, P-Al(60% en relación al testigo) y P-Fe; 2) Disminución del P-fácilmente reemplazable y del P aprovechable; y 3) Ningún efecto sobre la mineralización del P-orgánico. En este mismo estudio, la adición de sílice, como Na_2SiO_3, tuvo los siguientes efectos: 1) Cambios de poca consideración en los fosfatos de calcio, P-orgánico y P-aprovechable; 2) Disminución del P fácilmente reemplazable; y 3) Incremento del P Fe y P-Al. También se encontró que la precipitación total (P-Fe, P-Ca, P-Al) del P-aplicado se incrementó, siendo mayor por acción de la sílice en comparación con la cal. Finalmente, la fijación total o la capacidad de fijación del P (precipitación total - adsorción) sufrió una disminución sustancial y significativa cuando se agregó sílice pero no cuando se agregó cal.

De acuerdo con Salas-López y Ortega y Guerrero citados por Burbano y Mafla (6), el incremento de los fosfatos de calcio, especialmente del P-Ca no apatítico y del P-Al, por el encalamiento, no es un efecto netamente negativo, ya que particularmente los P Ca no apatíticos y los P Al son los que restituyen gran parte del P-absorbido por las plantas.

Deficiencias de fósforo en suelos colombianos.

Las deficiencias de fósforo en los suelos colombianos han sido localizadas principalmente en las regiones altas, medias, en los Llanos Orientales y generalmente en aquellas áreas donde los suelos se caracterizan por su extrema acidez.

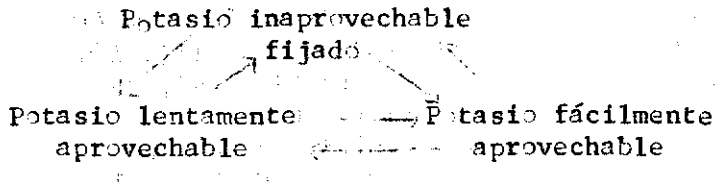
En las partes más frías del país, el fósforo es el elemento más limitante en la producción de las cosechas (26).

El Potasio.

Formas y cantidad en los suelos.

El potasio aprovechable en los suelos se origina por la desintegración y descomposición de rocas que contienen minerales potásicos como los Feldespatos, mosovita y biotita. El potasio también se encuentra en la forma de minerales secundarios o minerales de la fracción arcilla como la ilita o micas hidratadas, vermiculita, clorita y minerales interestratificados (Tisdale y Nelson, 41).

El potasio puede existir en tres formas en el suelo, de acuerdo con su aprovechabilidad, a saber:



Estas formas de potasio están en equilibrio en el suelo y un cambio en una forma resulta en una modificación de las otras. A su vez el potasio fácilmente aprovechable está en equilibrio con el potasio lentamente aprovechable como se indica en el esquema siguiente:

K lentamente aprovechable $\rightleftharpoons$ K^{+} intercambiable $\rightleftharpoons$ K en la solución del suelo.

Cuando en los suelos hay un alto suministro de K fácilmente aprovechable y otras condiciones de crecimiento son favorables. La absorción por las cosechas puede exceder sus requerimientos. Este fenómeno se ha denominado "Consumo de lujo de potasio por las plantas" (Tisdale y Nelson, 41).

Existen ciertos factores en el suelo que intervienen en la conversión del potasio añadido a formas menos aprovechables, a saber: 1) Tipo de coloide" 2) Temperatura; 3) Humedecimiento y secamiento; 4) Reacción del suelo o pH; y 5) Tipo de planta (Tisdale y Nelson, 41).

Tipo de coloide.

La fijación de potasio toma lugar en aquellos suelos que contienen minerales arcillosos del tipo 2:1 expandibles como la montmorillonita y la Illita. Las arcillas 1:1 como la caolinita no fijan potasio. Esto sugiere que la fijación del potasio es el resultado de un bloqueo del ión K entre las láminas del mineral 2:1. En estos minerales la abertura de la red de oxígeno de las láminas de sílice es de tamaño similar a la del ión potasio (1, 3 Å). Esto permite la localización interna del ión, el cual queda firmemente retenido por fuerzas electrostáticas. Similarmente, el ión NH_4 con un radio iónico aproximadamente igual al K, puede ser fijado por los minerales arcillosos 2:1. La presencia del ión NH_4 en el suelo puede alterar la fijación del K añadido y la liberación del K fijado.

Temperatura.

Burns y Barber citados por Tisdale y Nelson (41), encontraron en varios suelos que aún incremento en la temperatura correspondía un aumento en el K intercambiable. Palencia y Martini citados por Cox (9), observaron que el K intercambiable se incrementa con un aumento en la temperatura anual promedio y se disminuía con un aumento en la elevación.

Humedecimiento y secamiento.

Según Tisdale y Nelson (41), al someter un suelo húmedo a secamiento se presenta generalmente un incremento en la cantidad de potasio intercambiable que puede ser extraído. Este fenómeno es particularmente cierto cuando el nivel de potasio en el suelo es medio a bajo. Cuando los niveles son altos el fenómeno puede ser una disminución del potasio intercambiable. Los mecanismos que determinan este comportamiento del potasio no están bien entendidos, pero podrían obedecer al tipo de arcilla dominante en el suelo. Según Dowdy y Hutcheson citado por Frye y Leal (14), la liberación de potasio por secamiento se debe a la Illita. La fijación en húmedo a la vermiculita y la fijación por secado del suelo a la montmorillonita.

Reacción del suelo.

El efecto del pH en la liberación o fijación del potasio ha sido contradictoria y parece obedecer más a la clase y cantidad de iones adsorbidos en las arcillas que al pH propiamente. En estudios realizados por Baver citado por Tisdale y Nelson (41), se encontró que la fracción de potasio intercambiable perdido por lavado está inversamente relacionado con el grado de saturación de bases.

Tipo de la planta.

De acuerdo con Tisdale y Nelson (41), las plantas difieren en su habilidad para utilizar el potasio nativo y el fijado en el suelo. Esta

condición está relacionada con la CIC de las raíces. Plantas con CIC baja utilizan mejor el potasio nativo del suelo. La CIC baja parece estar asociada con un requerimiento bajo de calcio. Es así como los cereales y pastos gramíneas responden generalmente menos a las aplicaciones de potasio, que las leguminosas.

Deficiencia de potasio en los suelos colombianos.

Las deficiencias de potasio en los suelos colombianos han sido relativamente variables. Las únicas deficiencias significativas han sido encontradas en las terrazas aluviales y en las altillanuras planas de los Llanos Orientales, en la Sub-Estación "La Selva" en Rionegro(Antioquia) y en la Estación "Tulio Ospina" de Medellín en un suelo que había tenido pastos de corte fuertemente fertilizados con nitrógeno. En general es bastante común encontrar poca respuesta inicial al potasio, pero cuando se continúa el cultivo el potasio del suelo se disminuye y si la producción se aumenta a través del uso de otros fertilizantes, la necesidad del potasio usualmente llega a ser más pronunciada, como en el caso de los Llanos Orientales (Marín, 26).

El Calcio.

El Ca^{++} es un nutrimento secundario que las plantas requieren en cantidades moderadas. Este elemento generalmente se aplica al suelo haciendo parte de materiales llamados enmiendas y que se utilizan para corregir condiciones extremas de acidez.

Efectos anatómicos y citológicos causados por la deficiencia de Ca^{++}. Efectos celulares y sub-celulares.

El Ca^{++} es absorbido por las plantas en forma catiónica-Ca^{++} y dentro de ellas cumple varias funciones a saber: 1) Interviene en la formación de la pared celular, especialmente en la lámina media donde se encuentra como Ca^{++}; 2) Es un activador de sistemas enzimáticos como amilasa, la arginina-kinasa y la ATP-Asa. Estos sistemas reducen su actividad en condiciones de carencia de Ca^{++}; 3) Interviene en los procesos de reducción de los NO_3 y en el metabolismo de los amino-ácidos y carbohidratos y en su translocación; 4) Interviene en la formación de las membranas celulares y de las mitocondrías; y 5) este elemento estabiliza la actividad de los cromosomas. En condiciones de deficiencia de Ca^{++} la mitosis de las células es anormal (Lora y Riveros, 22).

Síntomas visuales.

El calcio es un elemento relativamente inmóvil o pobremente translocado dentro de la planta. Por esta razón, visualmente los síntomas de deficiencia de calcio se manifiestan generalmente bajo tres formas:

1) Ennegrecimiento y encrespamiento de los márgenes de las hojas apicales, con posterior necrosis y detención del crecimiento. En muchas plantas los síntomas se asemejan a la toxicidad del aluminio; 2) Desarrollo pobre de la raíz, debido posiblemente al requerimiento de Ca

de la estructura membranosa el cual se agudiza en células en división. Como el Ca^{++} es un elemento pobremente translocado el ápice de la raíz es severamente afectado; y 3) Disminución en la formación de frutos y semillas. El óvulo se colapsa y ocurre necrosamiento irregular de los cotiledones embrionarios (Lora y Riveros, 22).

Calcio removido del suelo por las cosechas.

La cantidad total de un nutrimento removido del suelo por una cosecha depende entre otros, de factores conjuntos del suelo, clase de cultivo y del clima. En relación al Ca^{++} los requerimientos son muy variados tal como se observa, a manera de ejemplo, en la Tabla 5.

Formas y cantidad en los suelos.

El Ca^{++} hace parte de varios minerales y rocas en el suelo como en la anortita, anfiboles y piroxenos gabros, feldespatos, gneiss, basaltos, dolomitas y apatitas. La calcita es el carbonato mineral con más alto contenido de Ca^{++}. Este compuesto por procesos industriales de las cales vivas o apagadas utilizadas como correctivos. Finalmente, el Ca^{++} se puede encontrar en suelos de regiones áridas y semi-áridas como yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) (Tisdale y Nelson, 41).

En el suelo el calcio puede existir en muchas formas. Puede estar presente en la solución del suelo formando sales tales como nitratos, bicarbonatos, cloruros y sulfatos; en forma intercambiable adsorbido a la fracción coloidal; como calcio activo e inactivo. Según Duchanfour citado por Gabdan y Colaboradores (15), el Ca^{++} activo lo constituyen las partículas finas de carbonatos solubles en aguas cargadas de CO_2. En esta condición se forman bicarbonatos que ceden el Ca^{++} al complejo adsorbente del suelo, quedando intercambiable. El Ca^{++} inactivo se encuentra en la fracción más gruesa de los suelos.

El contenido de Ca^{++} total varía entre 0, 1 y 2,0 por ciento en suelos no calcáreos. En suelos calcáreos pueden llegar hasta un 25% de CaO. En cambio, el calcio intercambiable oscila entre 1,0 y 50 me/100 g. de suelo, y la cantidad soluble en agua es muy variable. Parra y Gamboa (34), en la Tabla 6 se presentan datos que ilustran la situación del Ca^{++} en suelos volcánicos de Nariño (Colombia). Estos datos muestran que aunque las fracciones más aprovechables de Ca^{++} para las plantas son relativamente bajas, las cosechas pueden estar bien suplidas de este nutrimento si se tiene en cuenta que el Ca^{++} activo es alto. En estos suelos, los cultivos no han mostrado respuesta al encalamiento tanto en condiciones de campo como de invernadero.

Factores que afectan la aprovechabilidad del Ca^{++}.

Entre los principales factores que afectan la aprovechabilidad del Ca^{++} para las plantas se encuentran: 1) Reacción del suelo; 2) Cantidad de Ca intercambiable; 3) El grado de saturación del complejo de intercambio; 4) El tipo de coloide; 5) La naturaleza y cantidad del ión complementario presente y 6) el tipo de planta. Todos estos factores actuando individual o conjuntamente determinan en gran parte la disponibilidad del Ca^{++}.

TABLA 5. Calcio removido del suelo por varias cosechas (Tomado de Fertilizer Handbook-1967).

Cultivo	Producción (t/Ha)		Ca en kg/Ha		
	Frutos	Paja	Frutos	Paja	Total
Maíz	5,2	4,5	2	26	28
Arroz	2,2	3,0	4	11	15
Alfalfa	-	4,0	-	112	112
Soya	1,2	-	7	-	7
Cebolla	-	15	-	22	22
Papa	12	-	3	-	3
Naranja	28	-	33	-	33

TABLA 6. Concentraciones promedias de diferentes fracciones de Ca en dos suelos volcánicos de Nariño (Gabdan y Colaboradores (15), Parra y Gamboa (34).

Fracciones de Calcio	Localidades			
	Altiplano de Pasto		Altiplano de Ipiales	
	Ca ppm.	%	Ca ppm.	%
Ca - total	9658	(100)	14.156	(100)
Ca - activo	5973	(63)	6.286	(42)
Ca --inactivo	3685	(37)	8.679	(58)
Ca - intercambiable	518	(5)	1.938	(14)
Ca - soluble	2	(0.1)	246	(2)

pH, Ca^{+} intercambiable y grado de saturación.

El pH es un índice de la acidez o alcalinidad de un suelo. En general, los suelos cuando pierden sus bases por lixiviación se desaturan y, correlativamente, se incrementa la acidez. En los suelos ácidos, el hidrógeno y el aluminio son los cationes predominantes. En los suelos casi neutros el calcio y magnesio junto con otros cationes, equilibran las cargas negativas. En los suelos fuertemente alcalinos es muy elevada la proporción de sodio intercambiable.

La cantidad de Ca^{+} intercambiable presente en un suelo no indica "per-se" la disponibilidad para una cosecha determinada. Aparte de esta fracción existen otras que se deben tener en cuenta como el Ca^{+} activo, el Ca en solución y la cantidad de Ca^{+} intercambiable con relación a otras clases de cationes retenidos en la fracción arcilla.

El grado de saturación de Ca^{+} es de importancia debido a que la cantidad adsorbida en forma intercambiable disminuye a medida que aumenta la CIC, disminuyéndose el Ca absorbido por las plantas.

En las Tablas 7, 8, 9 y 10 se presenta en forma condensada parte de la información que existe en Colombia sobre los tres conceptos antes mencionados. Se observa en esos datos que no existe un comportamiento consistente sobre la respuesta al encalamiento basados únicamente en el pH, saturación de calcio y Ca^{+} intercambiable. En la mayoría de las localidades, la respuesta al encalamiento es también dependiente de otros factores como el contenido de materia orgánica, aluminio intercambiable, relación Ca/Mg, grado de desarrollo del suelo, tipo de coloide dominante, método de incorporación de la cal, tiempo de reacción con el suelo y del tipo de planta. Sin embargo, es importante anotar, basados en los datos de las Tablas 7 a 10 que, independientemente del suelo, cultivo o pH, cuando la saturación catiónica y la saturación con calcio es menor de 30 por ciento de la capacidad de intercambio catiónico permanente o carga permanente, la probabilidad de respuesta al encalamiento es bastante alta (> 70%). Para saturaciones superiores al 50 por ciento la probabilidad de respuesta es muy baja.

Tipo de arcilla y efecto del ión complementario.

De acuerdo con Tisdale y Nelson (41), el tipo de arcilla influye en el grado de aprovechabilidad del calcio. Las arcillas del tipo 2:1 requieren un mayor grado de saturación que las arcillas del tipo 1:1. La montmorillonita (2:1) por ejemplo requiere una saturación del 70% o más con Ca^{+} para que este elemento sea liberado fácilmente para el crecimiento de las plantas. La caolinita (1:1), es capaz de satisfacer los requerimientos de Ca^{+} de la mayoría de los cultivos a valores de saturación de 40 a 50% (Tisdale y Nelson, 41). Allaway citado por Marín (27), obtuvo un grado de aprovechabilidad del calcio para la soya del orden: caolinita > illita > bentonita (montmorillonita). En cada coloide la aprovechabilidad del Ca^{+} intercambiable se aumentó con el aumento de la saturación de calcio. Melich citado por Tisdale y Nelson (41), encontró que una arcilla 2:1 (beidelita) saturada

TABLA 7. Efecto del encalamiento en el rendimiento de cosechas, en suelos de la región húmeda tropical colombiana (De Pozo, 21).

Propiedades del suelo	Localidades						
	Barranca-bermeja	El Tablazo	Meta	Arara-cuara	Maguaré	Puerto Linares	Llan
pH	4,7	5,3	5,2	4,6	4,4	5,2	4,9
CIC, me/100 g.	11,0	15,0	15,2	15,2	14,3	17,0	6,5
Saturación calcio%	27,3	50,0	5,8	8,5	9,7	5,4	25,1
Saturación catiónica%	37,4	84,7	14,2	13,5	4,2	10,1	-
Textura	Ar.	F.Ar.A.	F.Ar.	F.Ar.	F.Ar.	F.Ar.L.	F
Tratamientos (t/Ha)	Respuesta evaluada en base al rendimiento relativo en %						
0	23	98	100	16	100	100	100
1/2 CaO	-	-	-	-	201	87	-
1 $CaCO_3$	-	-	-	-			77
1 $CaCO_3$	-	100	83	-	-	-	-
4 $CaCO_3$	100	-	6	100	-	-	-
6 $CaCO_3$	-	-	1	-	-	-	-
Cultivo	Lechuga romana	Lechuga romana	Rábano rojo	Lechuga romana	Rábano	Rábano	Rábano

TABLA 8. Efecto del encalamiento en el rendimiato de cosechas, en suelos de la Sabana de Bogotá y el departamento de Boyacá (Vega y Navas, 43).

Propiedades del suelo	Localidades						
	Serie Cabrera	Serie Tibaitatá	Serie Río Bogotá	Serie Bonza	Tutazá	Samacá	Paipa
pH	4,9	5,3	4,5	5,4	5,0	5,0	6,2
CIC me/100 g.	51,4	37,3	36,5	16,5	39,0	23,0	9 2
Ca me/100 g.	4,9	6,4	10,2	10,3	1,6	6,4	7 9
Saturación catiónica%	8,8	23,4	45,1	74,5	9,3	34,1	125,0
Saturación calcio%	4,9	17,2	28,1	62,4	4,7	27,6	
Tratamientos cal (t/Ha)	Respuesta evaluada en base a rendimiento relativo en %						
0	100	100	100	100	100	100	100
2	-	-	-		103	91	98
4	-	-	-	-	-	-	
5	145	101	139	49	-	-	
Cultivo	Cebada	Cebada	Cebada	Ryegrass	Papa	Papa	Papa

TABLA 9. Efecto del encalamiento en el rendimiento de cosechas, en suelos negros orgánicos de la Sabana de Bogotá, La Selva (Antioquia) y de la meseta de Popayán (Lotero y Colaboradores, 24).

Propiedades del suelo	La Esmeralda	Tibaitatá	La Selva	La Selva	Meseta	Meseta
			Antioquia		Popayán	
pH	5,1	5,1	4,8	4,8	4,7	4,7
CIC me/100 g.	27,7	27,7	51,2	51,2	21,3	21,3
Ca me/100 g.	10,1	10,1	0,8	0,8	2,4	2,4
Saturación catiónica %	60	60	2,4	2,4	19,0	19,0
Saturación calcio %	36	36	1,6	1,6	11,0	11,0
Tratamientos cal (t/Ha)	Respuesta evaluada en base a rendimiento relativo en %					
0	100	100	100	100	100	100
4	131	89	-	97	-	-
5	-	-	-		155	660
15	-	-	160	-	-	-
16	3 77	70		-	-	
Cultivo	Alfalfa	Alfalfa	Alfalfa	Gramíneas de corte	Papa	Alfalfa

TABLA 10. Efecto del encalamiento en el rendimiento de gramíneas, en suelos rojos de Antioquia y los Llanos Orientales (Lotero y Colaboradores, 24).

Propiedades del suelo	Localidades		
	Tulio Ospina	El Nus	La Libertad
pH	5,5	4,9	4,7
CIC me/100 g.	25,3	9,2	4,5
Ca me/100 g.	3,3	2,4	0,6
Saturación catiónica	28,0	55,0	29,0
Saturación calcio %	13,0	26,0	13,0
Tratamientos cal (t/Ha)	Respuesta evaluada en base a rendimiento relativo en %		
0	100	100	100
2	123	99	133
Cultivo	Gramíneas de corte	Puntero	Braquiaria

en un 80% con Ca^{+} liberada una cantidad de Ca^{++} similar al de una caolinita saturada en un 35%.

Efecto del ión complementario.

Otro factor que afecta la aprovechabilidad de un catión (p.e. Ca^{++}) es el originado por "el efecto del ión complementario". Este efecto se define como la influencia de un ión adsorbido en la superficie coloidal sobre la liberación de otros también adsorbidos en la misma superficie (Tisdale y Nelson, 41). Dicho efecto está regido por el tipo de coloide, densidad de carga y energía de adsorción.

En el suelo, las fracciones que poseen intercambio iónico de importancia son la fracción-coloidal húmica y la inorgánica cuyo diámetro efectivo sea menor de 20 micras. Esta incluye los limos y las arcillas. En la materia orgánica, las cargas negativas provienen de los grupos fenólicos, carboxílicos, hidróxilos y de $-NH_2$ (Alexander, 1). En la fracción arcillosa, las cargas negativas generalmente provienen de: 1) Sustituciones isomórficas; 2) De la ionización de los grupos hidróxilos (OH) ligados a átomos de sílice (Si-OH) y a los bordes rotos de los planos tetraédricos (SiOH HOH SiO^{-} H_3O) (Tisdale y Nelson, 41).

En la materia húmica la CIC es muy alta, de aproximadamente 200 me/100 g. En cambio en las arcillas, la CIC es muy variable, pero en términos generales una secuencia de CIC decreciente podría ser: las arcillas del tipo 2:1 > 1:1 > óxidos de Fe. El alófano, a su vez, posee una CIC alta. En general, se acepta que a mayor CIC mayor será la capacidad del material coloidal para retener en forma intercambiable cationes como Ca^{++}, Mg^{++}, Na^{+} y K^{+} (Baver y Colaboradores, 4).

De acuerdo con Baver y Colaboradores (4), la densidad de carga (me/$m^2 x 10^3$) resulta de la relación entre la CIC de la arcilla (me/g.) y la superficie específica ($m^2/g.$). Esta indica la capacidad adsorbente/área de un mineral arcilloso. En la Tabla 11 se presentan algunas relaciones para diferentes minerales arcillosos.

En la Tabla 11 se observa que la caolinita tiene menor CIC y superficie específica que la montmorillonita, pero sus relaciones originan una densidad de carga mayor. Esta propiedad permite que los minerales arcillosos 1:1 como la caolinita adsorban preferentemente los cationes divalentes, mientras que los minerales 2:1, los cationes monovalentes.

La energía de adsorción de un ión a un mineral arcilloso depende, entre otros, de la lámina en que se hayan realizado las sustituciones isomórficas; del tamaño del ión; de la valencia; del grado de ionización; de la saturación de la arcilla y de la energía libre media (ΔF) de enlace. Esta última puede ser entendida como el trabajo necesario para llevar un ión adsorbido en la superficie de la arcilla al estado de disociación completa (Baver y Colaboradores, 4).

La energía de adsorción depende, en gran parte, de la valencia, y una

TABLA 11. Superficie específica, CIC y densidad de carga de varios minerales de arcilla (Tomado de Física de Suelos, Baver y Colaboradores, 4).

Arcilla	Superficie específica m^2/g.	CIC me/g.	Densidad de carga me/ m^2 x 103
Caolinita	14,8	0,035	2,4
Mica hidratada	150,0	0,250	1,5
Montmorillonita	690,0	0,920	1,3

secuencia de la facilidad de reemplazo podría ser: monovalentes divalentes trivalentes tetravalentes. En los cationes monovalentes el orden podría ser: $Li^+ > Na^+ > K^+ = NH_4^+ > Rb^+ > Cs^+$. En esta secuencia de adsorción el Li^+, siendo un ión muy pequeño es retenido con menor energía que el ión grande de Cs^+ debido a la gran capacidad de hidratación (Baver y Colaboradores, 4). Wiklander (44), considera que no existe un orden universal de poder de reemplazamiento de los iones. No obstante, resumiendo los conceptos expuestos se podría postular, con bastante aproximación, la secuencia de poder de reemplazamiento de $Al^{+++} > Ca^{++} > Mg^{++} > K^+ > NH_4^+ > Na^+ > Li^+$.

Como los cationes trivalentes o divalentes pueden ocupar o reaccionar con 3 ó 2 sitios negativos, la energía de enlace será el triple o doble en comparación con un catión monovalente. En consecuencia el Ca tendrá aproximadamente una doble energía de enlace a la del sodio(Na^+) a la del potasio (K^+) (Baver y Colaboradores, 4).

La naturaleza de los minerales arcillosos y la saturación catiónica también afectan la energía de enlace del catión absorbido. En los minerales de arcilla con retículo 2:1, los valores de la energía media libre (ΔF) Ca^{++} crece al aumentar el porcentaje de saturación básica, decreciendo después gradualmente. En la caolinita el (ΔF) Ca^{++} alcanza un grado máximo agudo a 90 por ciento de saturación. La energía máxima de enlace para los sistemas calcio sigue el orden: beidelita > ilita > Caolinita > Montmorillonita (Baver y Colaboradores, 4).

En resumen, basados en los conceptos anteriores podemos entender más fácilmente "el efecto del ión complementario" y en el cual se debe tener en cuenta: 1) Los coloides del suelo tienden a retener más fuertemente los cationes divalentes que los monovalentes y 2) Si las bases intercambiables de un suelo consisten principalmente de cantidades altas de iones monovalentes, K^+ y NH_4^+, en proporción a los divalentes Ca^{++} y Mg^{++}, los iones monovalentes podrán ser reemplazados más fácilmente que las divalentes. De ahí que la adsorción de los monovalentes (K^+ y NH_4^+) será mejor que la de los divalentes (Ca^{++} y Mg^{++}). En casos extremos, en que la relación de cationes monovalentes a divalentes sea muy amplia pueden ocurrir deficiencias de Ca^{++} y Mg^{++}. Un ejemplo de esto es la "hipomagnesia" o tetano de los pastos que a veces se presenta en rumiantes que pastorean en suelos deficientes en magnesio y en donde se hacen aplicaciones masivas de K^+ y quizás de NH_4^+ (Tisdale y Nelson, 41).

Casos como el de la hipomagnesia han sido indicados en varios países por investigadores como el reportado en Kenya por Robinson y Jones citado por López (20). Estos autores encontraron que aplicaciones continuadas de sulfato de amonio $(NH_4)_2SO_4$ rebajan considerablemente el pH y condujeron a una deficiencia de magnesio en cafetos, en suelos bajos en bases de cambio. Aplicaciones de un mulch de pasto Napier, con 5,5% de K en la materia seca, también provocó deficiencias de magnesio en cafeto, al aumentar el potasio intercambiable del suelo de 2,4 a 6,2 me/100 g. a pesar de haber aumentado el Mg^{++} de 4,0 a 5,4 me/100 g.

TABLA 12. Efecto de aplicaciones masivas de fertilizantes sobre el calor del Ca, Mg y % intercambiables, en % del valor del testigo, al 25 . mes. Serie Chinchiná (López, 20).

Catión	Testigo	Tratamientos			
		$N\text{-}NH_4$ 200 kg/Ha	K_2O 200 kg/Ha	$MgCO_3$ 2 t/Ha	$CaCO_3$ 2 t/Ha
Calcio	100	39	108	91	187
Magnesio	100	43	100	400	79
Potasio	100	86	104	100	91

Nota: Estos datos son de la zona de las raíces de café (10 primeros centímetros).

En Colombia, López (20), al estudiar el efecto de aplicaciones masivas de fertilizantes "in situ" en los cambios de las propiedades químicas de un suelo franco arenoso de la serie "Chinchiná"encontró (Tabla 12): 1) El poder de reemplazo catiónico, de los distintos iones aplicados como NH_4NO_3, K_2SO_4, $MgCO_3$ y $CaCO_3$ al suelo, guardó la siguiente relación $NH_4 > Ca^{+} > Mg^{+} > K$. Lo anterior indica, en estos suelos, un alto poder de desplazamiento del ión NH_4 sobre los iones Ca, Mg y K; un poder medio del Ca^{+} y Mg^{+} y un poder mínimo del K; 2) La fuente del fertilizante nitrogenado en forma amoniacal NH_4^{+}, debido al alto poder de desplazamiento del Ca^{++}, Mg^{++} y K^{+}, debe sustituirse porque podría originar deficiencias de estos elementos para el café en la zona de raíces y 3) El mínimo poder de desplazamiento del potasio por Ca y Mg^{+} hace pensar que en estos suelos se cumple, a través del tiempo, muy bien el equilibrio de potasio soluble ⇄ potasio intercambiable ⇄ potasio insoluble.

Lotero y Monsalve (25) Tabla 13 y Ramírez y Lotero (36) Tabla 14, en un suelo aluvial del Valle de Aburrá, al hacer aplicaciones masivas y continuas de fuentes nitrogenadas, para estudiar el efecto sobre algunas propiedades químicas y en la producción del pasto pangola, encontraron: 1) Las fuentes nitrogenadas ácidas como la urea y el sulfato de amonio incrementaban considerablemente la acidez y el contenido de aluminio intercambiable y disminuían la concentración de Ca^{+2}, Mg^{+2} y K^{+} intercambiables; 2) Hubo una secuencia de reemplazamiento de cationes por la urea ($CO(NH_2)_2$) y el ión NH_4^{+} del sulfato de amonio, en orden decreciente de $Ca^{++} > Mg^{++} > K > Na$ y 3) No hubo modificaciones de significación en la CIC.

Tipo de planta.

El requerimiento de nutrimentos y tolerancia a condiciones adversas en el medio de crecimiento varía considerablemente entre plantas de diferente especie o variedad, y aún dentro de una misma variedad con el desarrollo vegetativo. Las diferencias que se presentan obedecen a la habilidad para absorber los nutrimentos. Esta habilidad depende, entre otros, de la concentración del ión y de su relación con otros en la solución del suelo, de la rata de absorción de agua por la planta y de factores genéticos que se traduzcan en sistemas radicales con características favorables o desfavorables para la absorción de un determinado ión. Por ejemplo, las leguminosas al poseer generalmente una mayor CIC que las gramíneas en las raíces están habilitadas para tomar más rápidamente y en mayor cantidad cationes divalentes como Ca^{++} o Mg^{++} en comparación con los monovalentes K o Na (Tisdale y Nelson, 41).

La tolerancia diferencial a condiciones ácidas y a excesos de Al y Mn en el suelo es muy marcada entre especies de plantas y variedades. Foy y Brown (12), encontraron que el maíz, trigo y soya son más tolerantes al Al que el algodón, el cual a su vez es más tolerante que la cebada. Ouellette y Dessureaux (33), observaron que clones de alfalfa tolerantes al aluminio contenían menos Al en las puntas de las raíces, pero más Al y Ca en las raíces que clones sensibles al Al. En vista a estos resultados ellos sugieren que el Ca reduce la toxicidad del Al al reducir el transporte de este ión hacia la parte superior de la planta. En

TABLA 13. Efecto de dosis y frecuencias de aplicaciones de varias fuentes nitrogenadas en las propiedades químicas de un suelo aluvial del Valle de Aburrá (Lotero y Monsalve, 25).

	pH	CIC	Al	Dosis de N (200* = 5000**) kg/Ha Ca	Mg	K	Na	(me/100 g.
Propiedades químicas originales	5,7	8,4	-	4,0	1,6	0,2	0,2	
Fuentes aplicadas								
Nitrato de sodio	6,8***	8,2	0,3	4,5	1,2	0,06	2,80	
Urea	4,8	8,1	0,9	3,8	1,7	0,09	0,09	
Sulfato de amonio	3,9	8,2	4,4	0,6	0,7	0,06	0,07	

* N aplicado después de cada corte
** N aplicado después de 25 cortes
*** Propiedades químicas después de 25 cortes

TABLA 14. Efecto de la urea sobre algunas propiedades químicas de un suelo aluvial del Valle de Aburrá (Ramírez y Lotero, 36).

	pH	Al	Dosis de N (400* - 10.800**) kg/Ha CIC	Ca	Mg	K	Na	(me/100 g)
Propiedades químicas originales	5,8	0,5	5,3	4,0	1,6	0,2	0,2	
Tratamiento								
Urea	4,5	2,1	5,3	1,6	1,6	0,13	0,14	

* N aplicado después de cada corte
** N aplicado después de 25 cortes

contraste con lo anterior, las variedades de Ryegrass, trigo y cebada, tolerantes al Al, acumulan menos Al en o sobre las raíces que las variedades sensibles.

La tolerancia diferencial al aluminio entre variedades de diferentes especies de plantas parece estar estrechamente relacionada con la toma diferencial y transporte del Ca. Así, las variedades sensibles de trigo, cebada y soya al Al^{+} son más susceptibles a una dificiencia de Ca^{+} inducida por Al^{+} que las variedades tolerantes (Foy y Colaboradores, 13).

En Colombia, el efecto del encalamiento en plantas de diferentes especies y variedades y condiciones de suelo concuerda ampliamente con los criterios antes mencionados. Es así como Vega y Navas (43), en suelos de la Sabana de Bogotá, de la Serie Tibaitatá, encontraron una respuesta creciente al encalamiento en alfalfa a dosis aún superiores a 18 t/Ha de cal (Tabla 15). En cambio, cultivos de papa, maíz y asociaciones kikuyo-tréboles no respondieron a las aplicaciones de cal, y en algunos casos el encalamiento tuvo efectos depresivos en el rendimiento. Lotero y Colaboradores (24), en suelos rojos de La Libertad-Villavicencio, encontraron respuestas diferentes en rendimiento al encalar especies de gramíneas (Tabla 16). Aparentemente algunas de las gramíneas a pesar de ser, fenotípicamente similares presentan respuestas inversas.

En la Tabla 17 se presentan las propiedades químicas de suelos rojos de Carimagua y en las Figuras 2 y 3 las respuestas al encalamiento en variedades de arroz y en cosechas de maíz, fríjol y Caupí. Combinando los resultados de la Tabla 17 y de las Figuras 2 y 3 se puede deducir: 1) Que existen especies o linajes de plantas, como la variedad de arroz Blue-Bonnet 50 o fríjoles Caupí, que se adaptan muy bien a las condiciones de suelos fuertemente ácidos, pobres en bases intercambiables y con altos contenidos de aluminio; 2) En condiciones de secano algunas variedades semi-enanas de arroz responden sorprendentemente a la cal y 3) Para estos suelos oxisoles de Carimagua la aplicación de cal se requiere primordialmente como fuente de calcio y/o magnesio para plantas como caupí, fríjoles negros, maíz y fríjol común.

Requerimientos de cal en los suelos.

Antiguamente la aplicación de cal a suelos ácidos se efectuaba para elevar el pH, algunas veces cerca de la neutralidad, en la creencia de que esta condición produce efectos benéficos sobre el desarrollo de la mayoría de las plantas y aumenta la eficiencia de los fertilizantes. Sin embargo, siguiendo este criterio las aplicaciones de cal son muy altas, especialmente si el suelo es orgánico. Por ejemplo, Correa (8), en suelos negros, ácidos y con contenidos muy altos de materia orgánica encontró que los pH obtenidos a los 90 días de incubación eran mayores que los observados a los 30 días y que para subir el pH de 4,75 hasta 6,5 y 7,0 se necesitaban unas 60 t/Ha de cal. Resultados similares han sido reportados por Mera y León (30), para suelos negros de Nariño, La Selva y Boyacá. No obstante en suelos rojos de los Llanos Orientales, Mera y León (3), obtuvieron incrementos superiores a 2 unidades de pH con 10-20 t/Ha de $CaCO_3$. Rodríguez y Correa (37), en tres

TABLA 15. Efecto del encalamiento en el rendimiento, en t/Ha, de diferentes cultivos en suelos negros y ácidos de la serie Tibaitatá (Vega y Navas, 43).

$CaCO_3$ (t/Ha)	Cultivos			
	Alfalfa	Maíz	Papa	Trébol Kikuyo
0	2,78	6,65	24,2	2,36
4	2,80	-	23,0	
6	-	-	-	2,58
16	3,43	-	-	
18	-	-	-	

Nota: Características originales del suelo: pH 5,1; Ca y CIC: 10,0 y 28,7 me/100 gr, respectivamente.

TABLA 16. Efecto del encalamiento en la producción de forraje seco por corte, en t/Ha, de varias gramíneas, en suelos rojos de La Libertad, Villavicencio (Lotero y Colaboradores, 24).

Cal - t/Ha	Cultivos							
	Micay	Pasto Negro	Pangola	Puntero	Cordura	Guinea	Imperial	Elefante
0	3,1	2,0	2,7	3,7	5,0	2,6	27,5	15,4
4	4,1	2,8	2,7	5,6	4,6	2,8	26,0	25,4

Nota: Características originales del suelo: pH: 4,7; Ca, Mg, K y Al: 0,6; 0,5; 0,13; y 2,8 me/100 g. respectivamente, CIC 4,5 me/100 g.

TABLA 17. Propiedades químicas de un suelo de Carimagua, de las Sabanas Altas, Planas y bien drenadas (Tomado de CIAT, 7).

pH	4,5	C.p1	me/100 c.	4,5
M.O. (0-20 cm.)	5,0	Al^{+}	" "	3,5
P)ppm Bray II)	3,0	Ca^{+}	" "	0,5
		Mg^{+}	" "	0,3
Textura	F.Ar.	K^{+}	" "	0,09

1. C.P. = carga permanente o CIC a pH original.

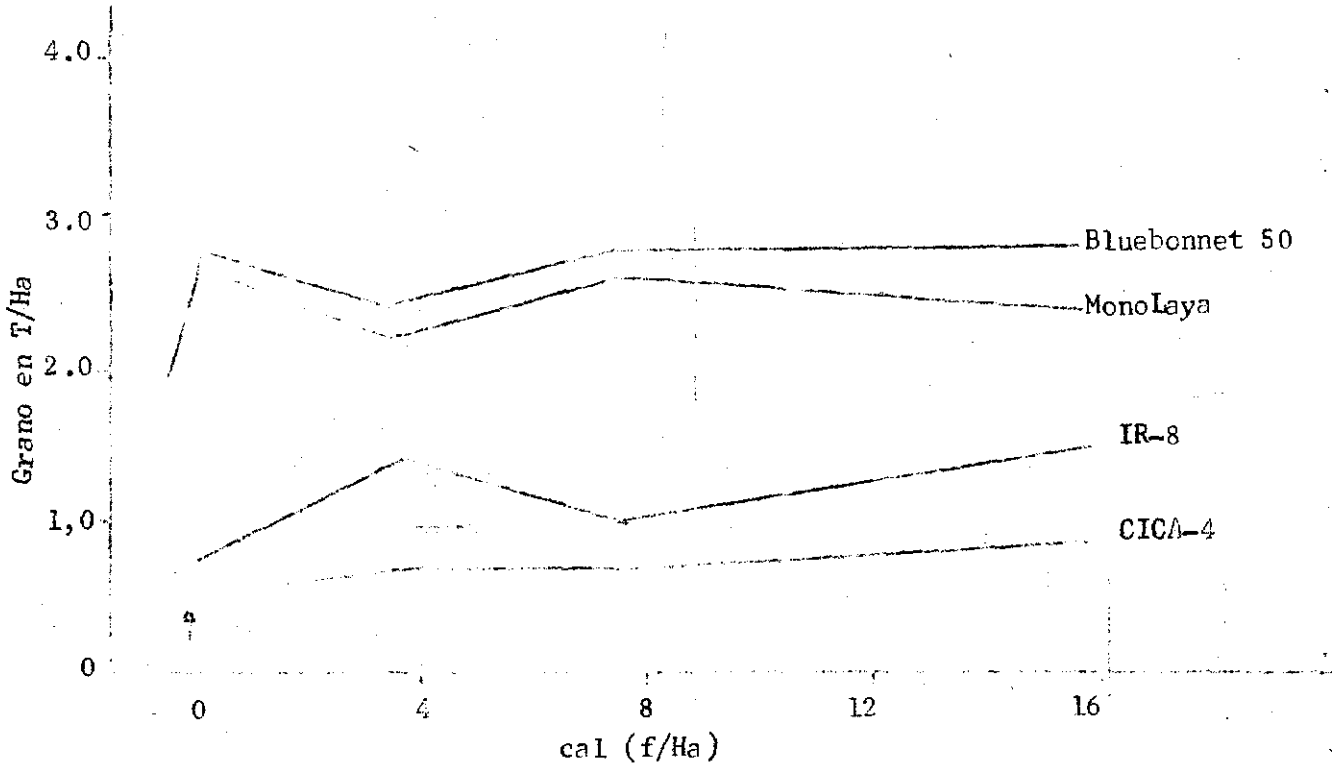


FIGURA 2. Respuesta de 4 variedades de arroz a las aplicaciones de cal en suelos de Carimagua.

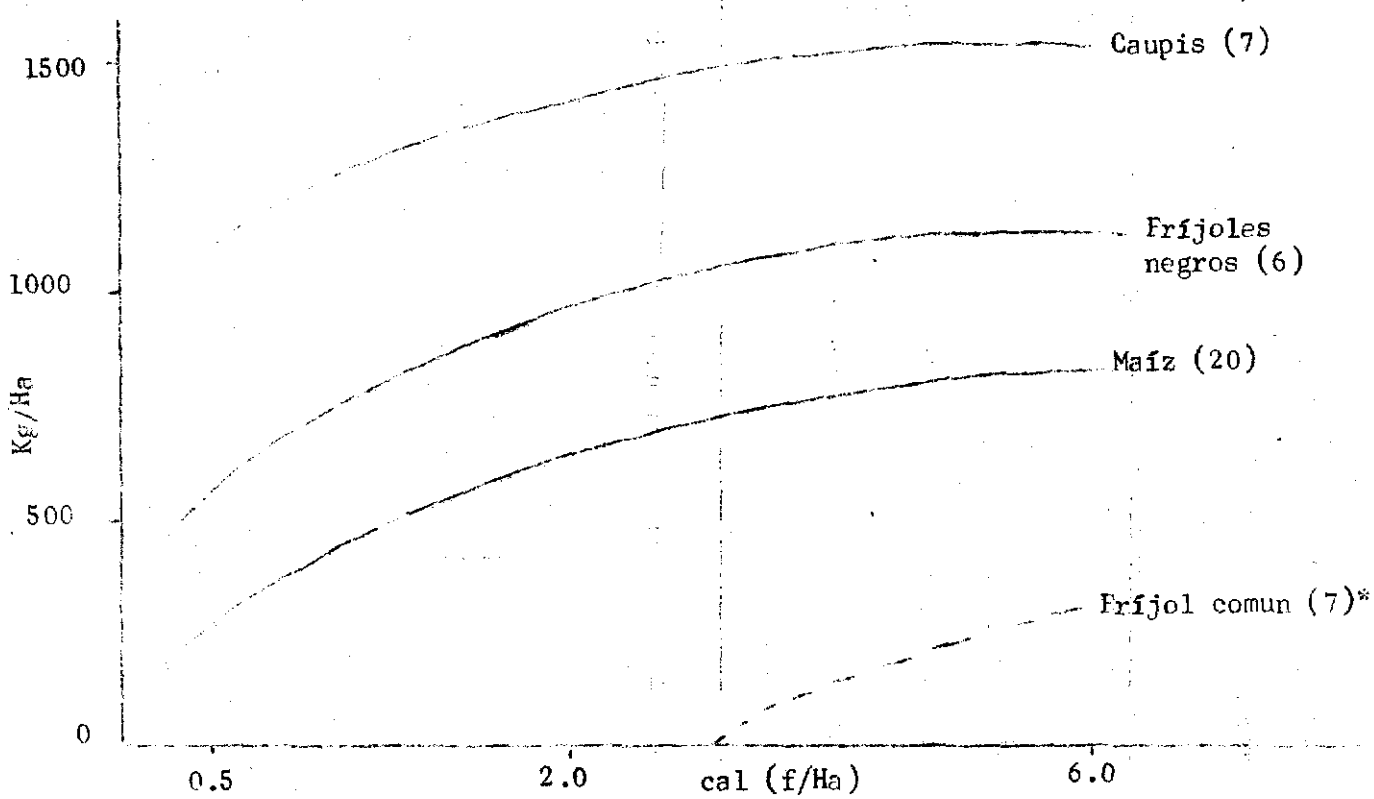


FIGURA 3. Respuestas de cultivos a diferentes dosis de cal en suelos de Carimagua.

* El número entre paréntesis son variedades de cada cultivo.

suelos rojos de Antioquia encontraron que el $CaCO_3$ y CaO tenían aproximadamente el mismo grado de neutralización y que para obtener en estos suelos, de un pH original inferior a 5.0, una acidez deseable (pH entre 6,0 y 6,5) se necesitan aproximadamente 15 t/Ha de cal ($CaCO_3$). La cal debe reaccionar con el suelo mínimo un mes, para alcanzar buenos resultados.

En investigaciones más recientes varios investigadores consideran que las adiciones de cal en suelos ácidos deben basarse en la naturalización de por lo menos el 80% de la acidez intercambiable (H + Al). Kamprath (17), Tobón y León (42), Ospina (32), Mera y León (30), en sus diferentes estudios sobre suelos de condiciones ácidas concluyen que las adiciones de cal en estos suelos deben basarse en el H y/o Al intercambiable extraídos con una sal neutra no "amortiguada". De acuerdo con Ospina (32) en suelos altos en materia orgánica, el encalamiento debe dirigirse a modificar los posibles efectos tóxicos del Al intercambiable a pHs bajos y a proporcionar un suministro adecuado de Ca^{++} y Mg^{++} más que a incrementar el porcentaje de saturación de bases y el pH del suelo. Según Kamprath (17), los requerimientos de cal basados en la acidez intercambiable debe calcularse de acuerdo a la siguiente relación:

me. de acidez intercambiable (Al) = me. de cal para neutralizar el aluminio intercambiable.

El factor (A) varía en función de condiciones en el suelo. Tobón y León (42), consideran por ejemplo que los factores del suelo que más influyen en los requerimientos de cal, para suelos de la zona andina colombiana y Llanos Orientales, son la materia orgánica y el contenido de arcilla.

A mayores contenidos de ellos en el suelo, mayores son los requerimientos de cal y viceversa.

De acuerdo con Kamprath (17), el factor (A) para suelos ácidos minerales (10% M.O. y pH 5,5) podrá ser de 1,5 a 2,0 (10% M.O. y pH 5.0) y para suelos con altos contenidos de materia orgánica (10% M.O. y pH 5.0) de 2 a 3. Es decir:

1) Suelo mineral:

me./100 g. de acidez interc. (H Al) x 1,5 -2,5= t/Ha de cal agrícola (con más de 80% de $CaCO_3$).

2) Suelo orgánico:

me./100 g. de acidez interc. (H Al) x 2-3= t/Ha de cal agrícola (con más de 80% de $CaCO_3$).

Sin embargo, al usar estas igualdades, es conveniente tener en cuenta,

de acuerdo a Mera y León (30), que los requerimientos de cal estimados por el método de acidez intercambiable son poco satisfactorios para provocar modificaciones del pH, pero este método es apropiado para neutralizar un alto porcentaje de aluminio intercambiable y posiblemente para el suministro adecuado de calcio al suelo.

Spain y Colaboradores (40), al estudiar la tolerancia diferencial de especies y variedades hacia la acidez del suelo, en suelos oxisoles de Carimagua, con 3,5 me./100 g. de Al intercambiable, encontraron especies forrajeras como el Stylosanthes (S. guyanensis), Kudzú, gordura (melinis minutiflora), bastante tolerantes a estas condiciones adversas de acidez y en donde aplicaciones pequeñas de cal (500 kg/Ha) actúan más como nutrimento (Ca^{++}) que como correctivo de acidez.

A continuación se presenta una tabla (18) con requerimientos tentativos de cal, para los oxisoles de Carimagua y para diferentes cultivos (Spain y Colaboradores, 40).

Tabla 1.9. Algunos cultivos tolerantes a suelos álicos, oxisoles de Carimagua (Tomado de Spain y Colaboradores, 40).

Cultivos	Requerimiento de cal-t/Ha		
Arroz secano	1/3	-	1/2
Yuca	1/4	-	1/2
Maíz	1	-	2
Piña	1/4	-	1/2
Cítricos	1/4	-	1/2
Plátano (topocho)	1/2	-	2

Deficiencia de calcio en suelos colombianos.

De acuerdo con Marín (26), la deficiencia de calcio en los suelos colombianos se pueden presentar con frecuencia en los suelos fuertemente ácidos, como los de los Llanos Orientales, y en otras áreas en donde por causa de una alta precipitación ha sido removido del suelo superficial por lixiviación o lavado como en la Costa del Pacífico y la región del Amazonas. En los suelos del Valle del Cauca, Magdalena, Sinú y Cesar se encuentran cantidades relativamente altas de calcio. En muchos suelos de las cordilleras Andinas y de la Sabana de Bogotá se presenta en cantidades medianas.

Fuentes de calcio y poder de neutralización.

De acuerdo con Tisdale y Nelson (41), los materiales de encalamiento se refieren principalmente a los carbonatos, óxidos e hidróxidos de calcio y de magnesio. Su valor de neutralización varía de un material a otro, así:

1) $CaCO_3 + 2HCl \rightarrow CaCl_2 + H_2O + CO_2$ VN* = 100
   100

2) $MgCO_3 + HCl \rightarrow MgCl_2 + H_2O + CO_2$ VN = 112
   84

* Valor de neutralización.

En la Tabla 19 se muestra el valor de neutralización de varios materiales usados como enmienda.

Otros factores que se deben tener en cuenta para considerar un material adecuado para encalamiento son: a) finura y b) contenido de carbonatos.

TABLA 19. Valor de neutralización (%) de algunos materiales*

Fórmula	Nombre comercial	Valor neutralización %
CaO	Cal viva	179
$Ca(OH)_2$	Cal apagada	136
$CaMg(CO_3)_2$	Dolomita	109
$CaCO_3$	Cal agrícola	100
$MgCO_3$	Carbonato de Mg	119
$CaSi_3$	Escorias de alto horno	86

* Tomado de Tisdale y Nelson (41).

a) Finura de la cal.

Materiales gruesos (4-8 mallas) tienen muy poca influencia sobre la modificación del pH y del aluminio intercambiable a corto plazo. Por su parte materiales con tamaño de partículas inferior a 30 mallas, reacciona rápidamente.

b) Contenido de carbonatos.

Generalmente calizas con menos de 70% de carbonatos, no son recomendables.

El Magnesio.

Funciones:

El magnesio (Mg^{++}) es un constituyente de la clorofila y está localizado en la parte central de dicha molécula. Según Hewitt citado por Lora y Riveros (22), la deficiencia de magnesio produce células medulares pequeñas y el clorenquima con un número anormal de cloroplastos. En los mitocondrios aparecen gránulos debido, posiblemente, a la rotura de las crestas o a que éstas no son sintetizadas. Según Jackson, citado por Lora y Riveros (22), el magnesio sirve como activador de varios sistemas enzimáticos de las diferentes rutas metabólicas de la planta, incluyendo fotosíntesis, respiración, síntesis y degradación de lípidos y transformaciones del nitrógeno. Prácticamente todas las reacciones que envuelven transferencia de fósforo son activadas por magnesio.

Síntomas visuales de deficiencia.

El magnesio es un elemento móvil y es translocado fácilmente de las partes más viejas a las más nuevas o jóvenes de las plantas cuando ocurre una deficiencia. Por esta razón los síntomas aparecen, a menudo, primero en las hojas más bajas. En muchas especies como el maíz, la deficiencia resulta en una clorosis intervenal de la hoja. En los estados más avanzados el tejido foliar toma un color amarillo pálido uniforme, luego un color pardo y finalmente muere. En otras especies como el algodón, las hojas más bajas se tornan de un color púrpura rojizo que gradualmente se vuelve pardo y finalmente necrótico.

Magnesio removido por las cosechas.

Los requerimientos de magnesio por los cultivos es relativamente bajo, si se tiene en cuenta las partes y funciones que ocupa en la planta. En general, los requerimientos de Mg^{++} son inferiores a los de Ca^{++}. En la Tabla 20 se observa el Mg^{++} tomado por diferentes cosechas.

TABLA 20. Magnesio removido del suelo por varias cosechas (Tomado de Fertilizer Handbook, 1967).

Cultivo	Producción t/Ha		Mg^{++} extraídos en kg/Ha		
	Frutos	Paja	Frutos	Paja	Total
Cebada	1,0	1,0	2	2	4
Maíz	5,3	4,2	8	20	28
Alfalfa	-	4,0	-	21	21
Papa	1,2	-	6	-	6
Soya	1,2	-	7	-	7

Formas y cantidad en los suelos.

El Mg^{++} constituye aproximadamente el 2% de la corteza terrestre. El contenido de magnesio total del suelo es muy variable, variando desde trazas en suelos arenosos, de regiones húmedas, hasta valores muy altos en suelos de textura fina, áridos o semi-áridos, provenientes de materiales parentales altos en Mg^{++} (Tisdale y Nelson, 41).

El magnesio en el suelo se origina por la descomposición de rocas que contienen minerales tales como biotita; dolomita, clorita, serpentina y olivino. El Mg^{++} liberado por descomposición de los minerales portadores puede: 1) Perderse en las aguas de percolación; 2) Ser absorbidos por organismos vivientes; 3) Ser adsorbido por las arcillas o 4) Precipitarse en un mineral secundario. Este último fenómeno puede ocurrir principalmente en climas áridos (Tisdale y Nelson, 41).

Factores que afectan la aprovechabilidad del Mg^{++}.

Las plantas absorben el Mg^{++} en forma catiónica de la solución del suelo o por el mecanismo de intercambio de los coloides circundantes. Por esta razón el Mg^{++} para que sea aprovechable debe estar en forma intercambiable y/o soluble en agua.

Los mismos principios generales que se aplican a la liberación del Ca^{++} y K^{+} se puede aplicar al Mg^{++}. De acuerdo con Tisdale y Nelson (41), la absorción de Mg^{++} por las plantas depende: 1) Cantidad y clase de Mg^{++} presente; 2) Grado de saturación; 3) Naturaleza de otros iones intercambiables y 4) Tipo de arcilla.

Cantidad y clase de Mg^{++} presente.

En el suelo parece existir un equilibrio dinámico entre las diferentes formas de Mg^{++} lentamente aprovechable, Mg^{++} intercambiable, Mg^{++} en la solución del suelo. La forma lentamente aprovechable de Mg^{++} es favorecida en suelos ácidos, con abundante Mg^{++} soluble y en presencia de arcillas 2:1 (vermiculita, montmorillonita) debido, posiblemente, a una retención del Mg^{++} entre las láminas de esas arcillas.

Grado de saturación y relación Ca/Mg.

Según Bear y Toth citados por Gómez y Colaboradores (16), debe existir una saturación de Ca^{++} del 65% y de Mg^{++}, del 10% en un suelo para una buena relación Ca/Mg y aprovechabilidad de los mismos. De acuerdo con Lipman, citado por León (19), existe posiblemente una relación Ca/Mg óptima para cada cultivo o grupo de cultivos y Low citado por el mismo, cree que la mayoría de los cultivos se adaptan bien a la relación Ca/Mg 2:1. Cuando la relación Ca/Mg es muy amplia, los cultivos pueden sufrir por escasez de magnesio, aunque el Mg^{++} se encuentre en cantidades considerables en el suelo. Una relación amplia K/Mg también puede originar una deficiencia de Mg^{++}. Es el

caso de la "Hipomagnesia" o tetano de los pastos que se presenta en animales que se alimentan con pastos que crecen en suelos deficientes de Mg^{++} donde se han aplicado dosis altas de K (Tisdale y Nelson, 41).

Los suelos que contienen una elevada proporción de magnesio de cambio tienen una baja permeabilidad y las plantas que se desarrollan en ellos, generalmente, presentan una menor concentración de Ca^{++}, comparados con plantas normales, Russell citado por Mantilla, Ríos y León (28). La mala permeabilidad de un suelo con relación Ca/Mg invertida o con altos contenidos de Mg se debe al efecto dispersante de este ión, el cual tiene una alta capacidad de hidratación. Según Russell citado por Mantilla, Ríos y León (29), a un exceso de Mg^{++} de cambio en el suelo se le atribuyen propiedades análogas a las que imparte un exceso de sodio en el suelo. Hayduk y Hans Krecht citados por Gómez y Colaboradores (16) consideran que los suelos magnésicos se caracterizan por su antagonismo entre cationes, principalmente Ca y Mg; sus condiciones físicas desfavorables y su reacción alcalina. Dichos autores aconsejan para estos suelos, entre otras cosas, aplicaciones de potasio y la siembra de plantas resistentes a esta condición como el maíz y la remolacha.

Mantilla y León (29), en un suelo de pH 8,1 y relación Ca/Mg (1:3) del Valle del Cauca, tratados con yeso ($CaSO_4.H_2O$) y $CaCl_2$ en mezcla con otras sales que contenían iones K^+, NH_4^+ o Ca^{++}, para observar su efecto en el desplazamiento del Mg y Na de cambio y en algunas propiedades físicas del mismo concluyen: 1) Las adiciones de yeso ($CaSO_4.H_2O$) sin mezclas con otras sales aumentaron la adsorción del Ca^{++}; el desplazamiento del Mg^{++} e incrementaron la permeabilidad ; 2) Las aplicaciones de yeso mezclado con $(NH_4)_2SO_4$ tuvo efectos similares al yeso solo pero más acentuados. Además hubo mayor desplazamiento de Mg y Na, y 3) El yeso incorporado al suelo, solo o mezclado con otras sales, parece ser más efectivo que el $CaCl_2$ en cuanto la adsorción del Ca^{++}; al desplazamiento Na y en el mejoramiento de la permeabilidad.

Gómez y Colaboradores (16), en base a datos obtenidos con 82 pruebas regionales a lo largo del Valle del Cauca encontró que en la mayoría de los suelos la relación Ca/Mg tiende a ser estrecha (0,6-3/1). Unicamente 3 localidades de las 82 tuvieron más Mg que Ca, en el complejo de cambio, en base a me/100 g. En 52 localidades donde se tuvieron ensayos de maíz, se pudo afirmar que la producción de este cultivo, en el Valle del Cauca, parece ser independiente de la relación Ca/Mg en el complejo de cambio de los suelos, dentro del rango 0,6 a 3,2 para esta relación.

León (19), estudió varias relaciones Ca:Mg:K en un suelo franco de "Florida" en Popayán. El más alto rendimiento en alfalfa lo obtuvo cuando se aplicaron 10 t/Ha de $CaCO_3$; 3,32 t/Ha de MgO y 200 kg/Ha de K_2O, lo cual dió una relación Ca:Mg:K de 2:1:0,27 y un pH de 6,2. Se indicó que la nutrición de Mg y K fueron factores críticos

en el rendimiento de la alfalfa especialmente cuando se utilizaron altas cantidades de cal. La respuesta al potasio aumentó especialmente con el aumento de la saturación de Mg en el suelo.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

En este artículo se hace referencia a factores y mecanismos que afectan y explican, en parte, la disponibilidad de los nutrimentos N-I-K-Ca y Mg, en suelos colombianos. De acuerdo con los estudios consultados se puede establecer que el "nitrógeno aprovechable" puede ser un mejor índice para recomendar fertilizantes nitrogenados que el contenido de materia orgánica.. El fósforo es el nutrimento más limitante para la obtención de buenos rendimientos en aproximadamente el 90% de los suelos dedicados a la agricultura y ganadería de Colombia, y el fenómeno que más afecta dicha aprovechabilidad es el de fijación. Sin embargo, no se sabe, con muy pocas excepciones, cuál(es)es el mecanismo que determina la alta capacidad de fijación de fosfatos, en los suelos ácidos o alcalinos. El K intercambiable como índice único para efectuar fertilizaciones potásicas puede llevar a errores muy graves, y es necesario tener en cuenta la planta y otras fracciones como la fracción más soluble del K-no intercambiable, suministro de K y tasa de lixiviación. En los suelos ácidos, la aplicación de cal para llevar el pH a valores próximos a la neutralidad o para neutralizar el Al-intercambiable puede, en algunos casos, ser una buena consideración, pero si se tiene en cuenta el criterio de la tolerancia de las diferentes especies de plantas a condiciones adversas de suelo, como sería alto aluminio y bajos contenidos de bases, las dosis de cal se rebajan muy considerablemente. El magnesio es un nutrimento muy poco estudiado en Colombia, y, a la luz de las actuales investigaciones, se sabe que a veces se presentan deficiencias en áreas muy localizadas y reducidas o problemas de relaciones Ca/Mg invertidas (1,0) como en algunas zonas del Valle del Cauca.

Finalmente, vale la pena llamar la atención en las aplicaciones masivas de cales de origen calcítico que pueden o deben estar originando serios problemas de fertilidad, al alterar las relaciones Ca:Mg:K. Este problema podría estar ocurriendo en suelos de los Llanos Orientales y en las cordilleras andinas, especialmente aquellos influenciados por cenizas volcánicas y dedicadas a cultivos de hortalizas.

BIBLIOGRAFIA

1. ALEXANDER, M. 1965. Introduction to soil microbiology. 3er Edition. John Wiley and Sons, Inc. New York. London Sydney. 3-459 p.

2. BLASCO, M. 1972. Mineralización del nitrógeno en suelos tropicales y volcánicos. Suelos Ecuatoriales (Colombia) 4(1): 83-92.

3. BLASCO, M. 1967. Effect of soil moisture content during incubation on the nitrogen mineralizing characteristics of the soils of Colombia. Geoderma 1: 19-25.

4. BAVER, L.D.; W.H. GARDNER y W.R. GARDNER. 1972. Física de suelos. Unión tipográfica Editorial Hispanoamericana. 4a. Edición.

5. BENAVIDEZ, S.T. 1963. Distribution of native phosphorus and phosphorus sorption capacity of some tropical soils of Colombia, S.A. M.S. Thesis. Stillwater, Oklahoma. Oklahoma State University. 103 p. (mimeografiada).

6. BURBANO, E.A. y A.B. MAFLA. 1973. Efecto de la adición de cal y sílice sobre formas y fijación de fósforo en suelos de Nariño y Putumayo. Facultad de Ciencias Agrícolas, Pasto (Nariño). 1-74 p. (Tesis en mimeógrafo).

7. CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL. CIAT. 1972. Secciones. Sistemas de Producción de Arroz y Suelos. Informe Anual. 141 a 184 p.

8. CORREA, V.J. 1959. Requerimientos de cal de los suelos orgánicos de "La Selva", Rionegro (Antioquia). Agric. Trop. (Colombia) 15(1): 27-32.

9. COX, F.R. 1973. Potasio. Un resumen de las investigaciones edafológicas en la América Latina Tropical. North Carolina, Agricultural Experiment Station. Technical Bulletin 219: 177-198 pp.

10. DE BENAVIDEZ, G. 1972. II-Efecto del encalado en la mineralización del nitrógeno en algunos andosoles. Suelos Ecuatoriales. (Colombia): 4(1): 69-83.

11. DE BOZO, V. ESPERANZA. 1971. Encalamiento en suelos de zonas cálidas y húmedas de Colombia. Suelos Ecuatoriales (Colombia): 3(1): 190-205.

12. FOY, C.D. y J.C. BROWN. 1964. Toxic factors in acid soils. II-Differential aluminum tolerancia of plant species. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 28: 27-30.

13. FOY, C.D., A.L. FLEMING, G.F. BURNS y W.H. ARMIGER. 1967. Characterization of differential aluminum tolerance among varieties of wheat and Barley. Agron. J. 31: 513-521.

14. FRYE, A.H. LEAL. 1970. Los estudios del potasio y su relación con la fijación y la fertilización en algunos suelos del Tolima. Agric. Trop. (Colombia): 26(2): 57-69.

15. GABDAN, J.; M. BLASCO y R. GUERRERO. 1972. El calcio en los suelos volcánicos del altiplano de Pasto. Rev. Ciencias Agrícolas. Univ. de Nariño. Fac. de Ciencias Agrícolas 4(1): 5-12.

16. GOMEZ, A.J.; F.D. ZORRILLA, C.A. FLOR y V.J. TORRAS. 1969. Influjo de la relación Ca/Mg en la producción del maíz en el Valle del Río Cauca, Colombia. Separata Rev. Agric. Trop. (Colombia): 24(2): Sin paginación.

17. KAMPRATH, E.J. 1967. Soil acidity and response to liming. Technical Bulletin No. 4. International Soil Testing. North Carolina State University.

18. LEON, S.A. 1966. Estudios químicos y mineralógicos de 10 suelos colombianos. Agric. Trop. 20:442-451.

19. LEON, S.A. 1968. Relaciones calcio, magnesio y potasio en suelos de la "Florida" Popayán. Separata. Rev. Agric. Trop. (Colombia): 24(6): (Sin paginación).

20. LOPEZ, M.A. 1965. Cambios químicos provocados en el suelo Chinchiná, franco-arenoso, con la aplicación de distintas fuentes y dosis de fertilizantes. Cenicafé (Colombia): 16: 55-76.

21. LORA, S.R. 1972. Estimación del nitrógeno disponible para la planta en algunos suelos de Colombia. Suelos Ecuatoriales (Colombia): 4(1): 304-316.

22. LORA, S.R. y G. RIVEROS. 1971. Problemas fisiológicos de plantas en suelos ácidos. Suelos Ecuatoriales (Colombia): 3(1): 25-42.

23. LOTERO, C.J. 1966. Formas de fósforo en el suelo, fijación y aprovechabilidad. Agric. Trop. (Colombia) 29(60): 275-284.

24. LOTERO, C.J.; S.A. MONSALVE, A. RAMIREZ y F. VILLAMIZAR. 1971. Respuesta de gramíneas y leguminosas forrajeras al encalamiento. Suelos Ecuatoriales (Colombia): 3(1): 210 239.

25. LOTERO, C.J. y S.A. MONSALVE. 1970. Efecto de fuentes y dosis de aplicación de nitrógeno en las propiedades químicas de un suelo. Rev. ICA 5(3): 199-220.

26. MARIN, G.M. y J. CHRISTENSEN. 1972. Suelos y fertilizantes. Boletín didáctico No. 1. ICA. Bogotá. 9-92.

27. MARIN, G.M. 1971. La capacidad de intercambio catiónico y las bases intercambiables del suelo. IN: Interpretación de análisis de suelos y recomendaciones de fertilizantes. Programa de Educación continuada. Instituto Colombiano Agropecuario ICA. Bogotá (Colombia): Sin paginación.

28. MANTILLA, G., S. RIOS y S.A. LEON. 1971. Estudios en suelos del Valle del Cauca con relación Ca/Mg invertida. I. Características generales de los suelos. Rev. ICA 6(1):41-56.

29. MANTILLA, G. y S.A. LEON. 1971. Estudios en suelos del Valle del Cauca con relación Ca/Mg invertida. II. Efecto de varias enmiendas en las propiedades químicas y físicas de un suelo de Guayabito. Rev. ICA 6(1): 57-72.

30. MERA, E.N. y L.S. LEON. 1971. Métodos rápidos para determinar requerimientos de cal en algunos suelos de Colombia. Separata de Agric. Trop. (Colombia): 6(3): 279-304.

31. MONSALVE, S.A. y J. LOTERO. 1972. Efecto residual del fósforo en un suelo negro de Antioquia. Rev. ICA 7: 159-171.

32. OSPINA, O. 1967. Aluminum organic matter complexes of the A horizon of some acid soils. Ph.D. Thesis. Riverside, University of California. 140 p.

33. OUELLETTE, G.J. and L. DESSUREANT. 1958. Chemical composition of alfalfa as related to degree of tolerance to manganese and aluminum. Can. J. Plant Sci. 38: 206-214.

34. PARRA, A. y J.J. GAMBOA. 1972. Fraccionamiento del calcio en suelos volcánicos del altiplano de Ipiales. Rev. Ciencias Agrícolas. Univ. de Nariño. Fac. de Ciencias Agrícolas (Colombia) 4(1): 13-22.

35. PERDOMO, M.A.; J. CORREA y L. MALAVER. 1968. Nutrición mineral. En Introducción a la fisiología de los cultivos Tropicales. Universidad Nacional de Colombia. Instituto Colombiano Agropecuario. Publicación Miscelánea No. 9 V-1 a V-3.

36. RAMIREZ, A. y C.J. LOTERO. 1969. Efecto de la dosis y frecuencia de aplicación de nitrógeno en la fertilidad y propiedades químicas del suelo. Rev. ICA 4(4): 227-254.

37. RODRIGUEZ, J.M. y J.V. CORREA. 1966. Efecto de la aplicación de cal en el grado de acidez de tres suelos rojos de Antioquia. Agric. Trop. (Colombia): 22(1): 47-54.

38. SANCHEZ, P. 1972. Fertilización y manejo del nitrógeno en el cultivo del arroz tropical. Suelos Ecuatoriales (Colombia) 4(1): 197-239.

39. SANCHEZ, S.L. 1974. Influencia de enmiendas sobre la fijación de fósforo en tres suelos ácidos colombianos. Universidad Nacional de Colombia. Instituto Colombiano Agropecuario. Tesis de M.S. Bogotá (Colombia): 22-87 p.

40. SPAIN, M.J.; C.A. FRANCES; R.H. HOWELER y F. CALVO. s.f. Tolerancia diferencial de especies y variedades hacia la acidez del suelo en cultivos y pastos tropicales (Hojas mimeografiadas) 1-15 p.

41. TISDALE, S.L. y W.L. NELSON. 1966. Soil Fertility and Fertilizers. 2o. Edition. The MacMillan Co. New York. 1-620 p.

42. TOBON, J.H. y L.A. LEON. 1970. Comparación de varios métodos para determinar requerimientos de cal en algunos suelos de Colombia. Rev. ICA (Colombia): 5(3): 307-326.

43. VEGA, V. y J. NAVAS. 1971. Encalamiento en suelos de clima frío. Suelos Ecuatoriales (Colombia): 3(1): 170-189.

44. WIKLANDER, L. 1964. Cation an Anion exchange phenomena. In. Chemistry of the Soil. 2a. Edition. Reinhold publishing Corporation. 163-205 p.