

ESTADO DEL MAGNESIO Y SU DISPONIBILIDAD PARA LAS PLANTAS EN SUELOS ANDINOS DE CUNDINAMARCA, COLOMBIA *

Gabriela E. Estrada (1) y Ricardo R. Guerrero (2)
Universidad Nacional de Colombia - Ciudad Universitaria, Bogotá, Colombia

RESUMEN

En 20 suelos (Inceptisoles) se determinó, en laboratorio, la capacidad de restitución y se caracterizaron las fracciones de magnesio. Se buscaron relaciones entre éstas y la absorción del elemento por Raygras (*Lolium hybridum*) mediante un ensayo en macetas, con el cual también se buscó identificar niveles críticos de disponibilidad.

Las fracciones se distribuyeron en promedio así (cmol kg^{-1}): Mg-minerales primarios (4,98 a 30,49) > Mg-soluble en ácido (0,41 a 3,89) > Mg-intercambiable (0,52 a 2,60) > Mg-unido a materia orgánica (0,09 a 0,54) > Mg-soluble en agua (0,01 a 0,089). El Mg-total (13,64 a 33,02 cmol kg^{-1}) fue mayor en suelos con alto contenido de material amorfo en su fracción arcilla.

El Mg-reserva correlacionó significativamente con el liberado a las 16 semanas de incubación. La tasa de restitución del elemento fue constante y muy alta.

El pH y el porcentaje de arcilla o de arcilla más limo no mostraron influencia sobre la disponibilidad del elemento. Las relaciones entre los cationes intercambiables (Ca, Mg, K), en general, no influyeron en la absorción del magnesio pero sí sobre su concentración en la planta.

Los índices más adecuados para evaluar la disponibilidad fueron Mg-intercambiable y su porcentaje de saturación. Para estos índices los niveles críticos establecidos estuvieron entre 1,1 y 1,4 cmol kg^{-1} y 5,1 y 6,4 por ciento, respectivamente, cuando la variable dependiente fue porcentaje de absorción relativa. El contenido de materia orgánica se manifestó como un índice adecuado para predecir la respuesta de la planta a la aplicación de magnesio.

Los suelos alofánicos (pH NaF, $1M \geq 9,5$) aunque con mayores reservas del elemento y mejor capacidad de reabastecimiento, evidenciaron mayores probabilidades de respuesta a la fertilización con magnesio.

Palabras clave: Fracciones de magnesio, restitución, nivel crítico, índices, disponibilidad, suelos alofánicos.

* Investigación realizada en el Programa para Graduados Universidad Nacional - Instituto Colombiano Agropecuario, Bogotá, Colombia y presentado en el X Congreso Argentino y VIII Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, 1983.

1) Profesora Asistente, Facultad de Ciencias, Departamento de Química.

2) Profesor Asociado, Facultad de Agronomía.

MAGNESIUM STATUS AND ITS AVAILABILITY FOR PLANTS IN ANDIAN SOILS OF CUNDINAMARCA, COLOMBIA

ABSTRACT

In 20 soils (Inceptisols) was determined, in laboratory, the restitution capacity and were characterized the magnesium fractions. Relations between them and element absorption by Raygras (*Lolium hybridum*) were studied through pot tests, also to identify critical levels of availability.

The magnesium fractions were distributed as follows (cmol kg^{-1}): Mg-primary minerals (4,98 to 30,49) > Mg-acid soluble (0,41 to 3,89) > Mg-exchangeable (0,52 to 2,60) > Mg-organic complexed (0,09 to 0,54) > Mg-water soluble (0,01 to 0,089). The Mg-total (13,64 to 33,02 cmol kg^{-1}) was higher on soils with higher content of amorphous material in the clay fraction.

The Mg-reserve significantly correlated with the one liberated after 16 weeks of incubation. Restitution rate was constant and high.

The pH, the percentage of clay or clay plus lime did not show significant influence on the magnesium availability. Relation between exchangeable cations (Ca, Mg, K), in general, did not influence the magnesium absorption but the element concentration in the plant.

The most accurate parameters to evaluate the element availability were Mg-exchangeable and the percentage magnesium saturation. Their critical levels were between 1,1 and 1,4 cmol kg^{-1} and 5,1 - 6,4 percentage, respectively, when dependable variable was percentage of relative absorption. Organic matter seemed to be an adequate parameter to determine response in yield to the magnesium adding.

Alophanic soils with higher reserve and better restitution capacity, seemed to have higher probabilities of response to magnesium fertilizing.

Key words: Magnesium fractions, restitution, critical level, parameters, availability, alophanic soils.

INTRODUCCION

El magnesio es uno de los elementos esenciales mayores que podría considerarse como elemento "huérfano" de la investigación edafológica a nivel tropical. Una buena parte de los suelos agrícolas de Colombia presenta condiciones ácidas, con niveles de magnesio que usualmente se consideran deficientes para los cultivos. De otra parte, se presentan suelos, o con relaciones Ca/Mg muy amplias, o con relaciones invertidas.

El magnesio se encuentra en los suelos como constituyente de minerales primarios y secundarios, en forma intercambiable en la cubierta iónica y en la solución del suelo (Fassbender, 1975). Mokwunye y Melsted (1972) aceptan una distribución semejante a la anterior, pero sostienen que la materia orgánica puede atrapar el magnesio en forma no intercambiable y sobre esta distribución diseñaron una metodología de fraccionamiento.

Las plantas toman el magnesio de la solución del suelo que está en equilibrio con el magnesio intercambiable. La mayor parte del magnesio total no es intercambiable pero esa fracción es la responsable de reno-

var el intercambiable removido por la cosecha o lixiviado (Salmon y Arnold, 1963).

Uno de los parámetros más utilizados como índice de disponibilidad de magnesio es su fracción intercambiable (NH_4Ac , 1M, pH 7), pero no siempre resulta apropiado y confiable. Por ello, se han hecho estudios tendientes a identificar expresiones que correlacionen mejor con el magnesio absorbido por la planta, tales como el porcentaje de saturación de magnesio en la cubierta catiónica de cambio (Alston, 1972), la relación Ca/Mg (Christenson et al., 1973; Mostafa y Ulrich, 1976), la relación Mg/K (Lombin, 1979), la actividad catiónica en la solución del suelo (Salmon, 1964) y el contenido de materia orgánica (Lombin, 1979).

En la caracterización de la capacidad de un suelo para reabastecer la fracción intercambiable del magnesio se han empleado varias técnicas, tales como el cultivo exhaustivo, métodos de incubación y métodos químicos (Lombin y Fayemi, 1976).

El presente trabajo se llevó a cabo con el objetivo de aportar al conocimiento del estado, dinámica y disponibilidad del magnesio en algunos suelos andinos de Colombia.

MATERIALES Y METODOS

Suelos

Para el estudio se tomaron muestras del horizonte A de suelos localizados en la cuenca alta del río Bogotá que comprende la denominada Sabana de Bogotá y sus alrededores, situada entre los 2.500 y 2.700 metros sobre el nivel del mar y en la zona montañosa alcanza hasta los 4.000 metros. Las formaciones vegetales predominantes son la de Bosque Seco Montano Bajo (500 a 1.000 mm por año de precipitación pluvial, 12 a 18°C) y Bosque Húmedo Montano (500 a 1.000 mm por año, 6 a 12°C).

El material parental de los suelos del Bosque Seco Montano Bajo consta de sedimentos aluviales y lacustres pertenecientes al Cretáceo, Eoceno, Oligoceno, Plioceno y Pleistoceno. En los suelos del Bosque Húmedo Montano predominan materiales del Cretáceo. Se han encontrado capas discontinuas de cenizas volcánicas (Guerrero, 1965).

Según Mejía (1967), en la fracción arcilla de estos suelos predominan la alofana, haloisita, caolinita y, ocasionalmente la vermiculita e illita. En la fracción densa de la arena, los ferromagnesianos (hornblenda e hiperstena especialmente) constituyen más del 50 por ciento de los minerales presentes.

Los suelos estudiados pertenecen al Orden Inceptisol, Subórdenes Tropept y Andept (Guerrero, 1965) y algunas de sus características pueden resumirse como sigue:

pH (agua 1:1): 5,1 - 7,0; Materia orgánica (Walkley Black): 1,3 - 23,8 por ciento; CIC (NH₄Ac, 1N, pH 7,0): 7,2 - 73,3 cmol kg⁻¹ Bases Cambiables (NH₄Ac, 1N, pH 7,0) (cmol kg⁻¹): Ca: 0,6 - 9,8; Mg: 0,4 - 2,9; K: 0,23 - 6,13; Na: 0,18 - 2,07; Aluminio Cambiable (Yuan): trazas - 1,2 cmol kg⁻¹; P-aprovechable (Bray II): 2 - 42 ppm; pH (NaF, 1M): 7,5 - 10,8. Las texturas predominantes fueron las franco-arcillosas y arcillosas.

Fraccionamiento del magnesio

Para la determinación de las diferentes fracciones del magnesio se siguió la marcha analítica propuesta por Mokwunye y Melsted (1972). Sin embargo, el Mg-estructural se calculó por diferencia entre el Mg-total y la suma de las demás fracciones, por cuanto la determinación directa no fue adecuada para los suelos estudiados.

Además, se determinó Mg-no cambiante disponible (por diferencia entre el cambiante a pH 1 y el intercambiante a pH 7 (NH₄Ac, 1N); Mg-soluble en agua

(Método de Heald, descripto por Téllez, 1977) y Mg-reserva (diferencia entre Mg-soluble en HCl 3N y Mg-intercambiante a pH 7).

Todas las extracciones se hicieron por triplicado y la determinación del magnesio se efectuó por espectrofotometría de absorción atómica, empleando La al 0,5 por ciento.

Capacidad de restitución

Para la determinación de la capacidad de restitución de Mg-intercambiante se siguió la técnica de incubación propuesta por Mokwunye y Melsted (1973).

Ensayo en macetas

Para cada suelo se prepararon 6 macetas con 0,8 kg de suelo cada una, de éstas solo 3 recibieron MgSO₄ en cantidad correspondiente a 1 cmol kg⁻¹. Todas las macetas recibieron una fertilización básica apropiada con N, P, K, Zn, Cu y Mo. Todos los fertilizantes se agregaron en solución.

Como planta indicadora se sembró Raygras (*Lolium hybridum*), variedad tetrelite, dejando 25 plantas por maceta. El cultivo se mantuvo al aire libre en Bogotá, Ciudad Universitaria (2.600 metros sobre el nivel del mar, 1.000 mm/año de precipitación pluvial promedio y 14°C de temperatura promedio anual).

Se hicieron tres cortes a un centímetro del suelo, cada dos meses, contados a partir de la germinación. El material vegetal se lavó con agua destilada, se secó en estufa durante 48 horas a 70°C y se determinó peso seco.

Análisis del tejido vegetal

El tejido vegetal seco, una vez molido y tamizado, se sometió a digestión con ácido sulfúrico al 5 por ciento en etanol, luego 3 horas a 500°C y disolución en caliente con HCl 1N, y en la solución se determinó el magnesio, mediante espectrofotometría de absorción atómica, empleando La (al 0,5 por ciento) como supresor de interferencias.

Análisis estadístico

Se efectuaron pruebas de T-student para evaluar en cada suelo la respuesta a la aplicación de magnesio. Además, se realizaron análisis de correlación lineal simple y cuadrática y de regresión lineal múltiple, entre las fracciones de magnesio, los niveles de restitución del elemento y las variables de respuesta (rendimiento relativo, concentración de magnesio en los tejidos y absorción de Mg por la planta) y entre aquellas y algunas características de los suelos.

Los niveles críticos se determinaron utilizando el método gráfico de Cate y Nelson (1971).

RESULTADOS Y DISCUSION

Fraciones de magnesio

En la Tabla 1 se presenta la distribución de las fracciones de magnesio en los suelos estudiados, para las cuales se obtuvo, en promedio, el siguiente orden de concentración: Mg-minerales primarios > Mg-soluble en ácido > Mg-intercambiable > Mg-materia orgánica, secuencia que resultó semejante a las obtenidas en suelos de zona templada y tropical (Mokwunye y Melsted, 1972) y en suelos de diferentes regiones de Colombia (Chamorro, 1977; Téllez, 1977).

La concentración de Mg-total fue en promedio más alta en los suelos con pH (NaF, 1M) mayor o igual a 9,5 (13 - 33 cmol kg⁻¹) que en el resto de suelos (8 - 21 cmol kg⁻¹). La mayor parte del magnesio total estuvo asociada a los minerales primarios (Mg-estructural) (4,5 - 30 cmol kg⁻¹), en tanto que el magnesio soluble en ácido que se considera ligado a la fracción coloidal (Mokwunye y Melsted, 1972), tan solo representó, en promedio, el 8,9 por ciento del total (0,4 - 3,9 cmol kg⁻¹), siendo aún más ba-

ja la participación del magnesio unido a la materia orgánica (0,09 - 0,54 cmol kg⁻¹). La fracción de Mg-intercambiable osciló entre 0,5 y 3,6 cmol kg⁻¹ y el Mg-reserva mostró una concentración promedio de 3,4 cmol kg⁻¹ que significó el 18 por ciento del total. Como era de esperar, el magnesio soluble en agua fue la fracción más pequeña (0,01 - 0,17 cmol kg⁻¹) y el Mg-no cambiante disponible no fue detectado en la mayoría de los suelos.

El Mg-reserva dependió directamente del Mg-total ($r = 0,71^{**}$) y lo mismo ocurrió en el caso de Mg-minerales primarios ($r = 0,98^{**}$) el Mg-intercambiable relacionó inversamente ($r = -0,68^*$) con el Mg-minerales primarios, en aquellos suelos con predominio de arcillas amorfas, pero, en contraste, la relación tendió a ser directa ($r = 0,56$) en el resto de suelos. La fracción de Mg-materia orgánica fue independiente del contenido de C-orgánico.

Capacidad de restitución

Los valores de magnesio intercambiable restituido en los diferentes períodos de incubación se presentan en la Tabla 2. La tasa de liberación de Mg fue constante en los diferentes períodos y la restitución fue significativamente mayor en suelos con predominio de coloides amorfos ($\bar{x} = 2,3$ cmol kg⁻¹) que en los demás suelos ($\bar{x} = 1,9$ cmol kg⁻¹). La capacidad de

TABLA 1: Fracciones de magnesio en los suelos estudiados y capacidad de intercambio catiónico (CIC).

Suelo	Mg-inter. pH 7	Mg-unido M. org.	Mg-soluble en ácido	Mg-min. primarios	Mg-total	Mg-soluble en agua	Mg-no inter. disponible	Mg-inter. pH 1	Mg-reserva	CIC
cmol kg ⁻¹										
1	0,83	0,13	1,43	7,82	10,20	0,043	0,08	1,04	2,91	18,6
2	2,60	0,44	2,60	7,71	13,34	0,012	- 0,18	2,69	2,48	45,7
3	1,06	0,09	3,25	17,54	21,94	0,022	0,10	0,99	4,42	66,6
4	1,21	0,12	0,93	11,73	13,98	0,018	0,07	1,10	3,90	13,7
5	0,75	0,28	0,44	7,84	9,30	0,017	- 0,04	0,68	1,18	7,2
6	1,06	0,15	0,43	8,35	9,98	0,010	- 0,03	0,90	0,93	24,2
7	1,04	0,19	1,45	18,78	21,46	0,023	- 0,05	0,84	0,52	16,2
8	1,50	0,19	0,41	12,26	14,36	0,025	- 0,05	1,37	2,41	15,0
9	2,08	0,30	1,33	10,97	14,67	0,029	0,12	1,70	1,04	25,7
10	0,52	0,31	3,89	8,39	13,10	0,022	- 0,10	0,41	3,17	19,5
11	0,55	0,43	1,94	4,98	7,90	0,018	- 0,03	0,61	1,37	18,5
12	1,50	0,12	1,73	21,65	24,99	0,051	0,04	1,61	2,87	47,8
13	0,72	0,30	2,19	9,26	12,46	0,005	- 0,04	0,60	1,58	31,5
14	1,25	0,14	1,37	27,93	30,67	0,010	- 0,03	1,05	9,55	73,3
15	2,57	0,54	1,95	21,93	26,98	0,025	0,14	2,20	8,16	55,7
16	0,91	0,36	1,27	30,49	33,02	0,015	- 0,03	0,79	7,41	71,4
17	0,88	0,37	1,62	23,12	26,04	0,018	0,03	0,79	4,64	46,8
18	2,03	0,22	3,09	15,83	21,16	0,089	- 0,06	1,68	1,78	23,3
19	0,54	0,26	1,46	22,81	29,06	0,023	- 0,04	0,58	3,20	57,7
20	0,56	0,20	1,30	27,25	29,30	0,014	0,04	0,41	5,47	49,7
Promedio	1,21	0,26	1,70	16,03	19,20	0,024	- 0,01	1,10	3,45	
Porcentaje	6,3	1,3	8,9	83,5	100,0	0,13		5,7	18,0	

Cada valor es el promedio de 3 repeticiones excepto Mg-total donde se hicieron dos.

TABLA 2. Restitución del magnesio intercambiable (valor acumulado en los diferentes períodos de incubación)

Suelo	2 semanas	4 semanas	8 semanas	16 semanas
c mol kg ⁻¹				
1	0,31	0,66	1,41	2,14
2*	0,39	0,65	1,41	2,20
3*	0,40	0,74	1,58	2,43
4	0,33	0,67	1,27	1,89
5	0,26	0,57	1,27	2,15
6	0,30	0,51	1,13	1,72
7	0,30	0,60	1,22	1,88
8	0,29	0,50	1,17	1,82
9	0,37	0,54	1,28	1,97
10	0,30	0,46	1,19	1,78
11	0,38	0,60	1,25	2,08
12*	0,35	0,42	1,07	1,97
13	0,29	0,42	1,19	1,93
14*	0,40	0,59	1,51	2,57
15*	0,47	0,64	1,43	2,38
16*	0,44	0,56	1,51	2,48
17*	0,44	0,55	1,29	2,23
18	0,42	0,49	1,25	1,93
19*	0,47	0,59	1,23	2,06
20*	0,42	0,54	1,46	2,32

Cada valor es el promedio de 3 repeticiones.

* Suelos con pH NaF mayor o igual a 9,5.

reabastecimiento de Mg en estos suelos se puede considerar alta y la tasa de liberación fue muy superior a la obtenida por Mokwunye y Melsted (1973).

Al correlacionar los valores de restitución con las fracciones de magnesio se encontró que con el Mg-reserva la relación fue positiva y altamente significativa en suelos alofánicos ($r = 0,83^{**}$), pero no existió en el resto de suelos. Esto supone que esta fracción constituye una buena medida de la capacidad de reabastecimiento del elemento en aquellos suelos con predominio de coloides amorfos (pH, NaF, 1M $\geq 9,5$). Considerando todos los suelos, también se evidenciaron correlaciones significativas con el Mg-total ($r = 0,61^{**}$) y el Mg-minerales primarios ($r = 0,59^{**}$), pero en cambio, el proceso de restitución no estuvo asociado con el Mg-intercambiable.

Desde el punto de vista práctico, la alta capacidad de restitución del magnesio intercambiable en los suelos estudiados debería conducir a no obtener respuesta a la fertilización magnésica, pero también supondría una alta susceptibilidad a las pérdidas del elemento por lixiviación.

Respuesta de las plantas al magnesio

La Tabla 3 recoge los resultados promedios obtenidos para la respuesta del raygras a la aplicación de magnesio en términos de materia seca, absorción total del elemento y concentración de Mg en los tejidos.

Tomando el rendimiento de materia seca obtenido en los tres cortes, solamente tres de los veinte suelos estudiados respondieron significativamente a la aplicación de magnesio. No obstante, en quince de los suelos estudiados (75 por ciento) hubo incrementos significativos ($P < 0,05$) en la absorción total del magnesio por las plantas, cuando se aplicó el elemento.

De otra parte, en diecinueve de los veinte suelos hubo respuesta estadísticamente significativa a la fertilización con magnesio, en términos de concentración del elemento en el tejido vegetal, para el primer corte, pero el efecto disminuyó en el segundo corte y en el tercero solamente se detectó en doce de los veinte suelos estudiados. En este último corte se encontró para algunos de los suelos que, cuando no se aplicó magnesio, el contenido del elemento en los tejidos de la planta fue inferior a 0,20 por ciento, nivel que se considera como el mínimo requerido para una adecuada nutrición animal (Alston, 1972).

Fraciones de magnesio en relación con la planta

Los coeficientes de correlación obtenidos entre las fracciones de magnesio, las variables de respuesta y algunas características de los suelos se recopilan en la Tabla 4.

Las fracciones de magnesio estuvieron pobremente correlacionadas con el rendimiento relativo. El Mg-reserva correlacionó significativamente ($r = -0,51^{*}$), pero con tendencia negativa, con esta variable de respuesta. Esta asociación fue más acentuada cuando se tomaron los suelos con predominio de coloides amorfos ($r = -0,75^{*}$) y no existió en el resto de suelos. El magnesio restituido también relacionó inversamente con el rendimiento relativo ($r = -0,71^{*}$), en el mismo grupo de suelos. La interpretación agronómica de estas correlaciones supone que, en los suelos alofánicos, al aumentar la reserva mediata de magnesio y su capacidad de reabastecimiento tienden a aumentar las probabilidades de respuesta a la aplicación del elemento.

El resultado anterior, aparentemente contradictorio, se explica si se piensa en que una mayor reserva a largo plazo no supone necesariamente alta disponibilidad del elemento, sino que, al contrario, con frecuencia implica bajos niveles de disponibilidad inmediata.

El Mg-reserva y el Mg-restituido relacionaron inversamente ($P < 0,05$) con las variables de absorción y concentración de magnesio, particularmente en el ca-

TABLA 3: Respuesta del Raygras a la aplicación de magnesio en términos de materia seca, absorción de magnesio y concentración de Mg en el tejido vegetal (promedios de tres replicaciones).

Suco	Materia Seca		Absorción total de Mg				Concentración de Mg (%)					
	(g/materia)		(mg/kg suelo)				1er. corte		2do. corte		3er. corte	
	-Mg	+ Mg	Rend. Rel. (%) (1)	-Mg	+ Mg	Abs. Rel. (%) (1)	-Mg	+ Mg	-Mg	+ Mg	-Mg	+ Mg
1	2,6	3,1	84,4	12,4	17,6	70,6**	0,37	0,51	0,42	0,47	0,32	0,35
2	5,8	5,0	114,5	35,0	34,7	100,8	0,44	0,55	0,44	0,53	0,42	0,43
3	3,7	4,0	91,7	10,1	15,7	64,4	0,25	0,38	0,24	0,38	0,19	0,25
4	1,8	1,9	96,4	10,3	13,1	79,4**	0,44	0,58	0,44	0,53	0,42	0,44
5	2,3	2,7	85,5*	12,0	20,9	57,3**	0,44	0,67	0,50	0,59	0,33	0,52
6	2,6	3,3	80,7*	14,1	24,5	57,6**	0,44	0,58	0,49	0,63	0,32	0,45
7	5,6	5,2	108,6	43,3	47,0	93,1	0,50	0,65	0,63	0,82	0,65	0,66
8	3,7	4,0	92,8	23,0	30,1	76,0*	0,51	0,69	0,53	0,64	0,40	0,45
9	3,4	3,3	101,8	19,5	22,6	86,1	0,42	0,54	0,46	0,58	0,38	0,41
10	2,2	2,1	103,2	7,3	15,3	47,8**	0,26	0,60	0,26	0,56	0,22	0,43
11	3,6	3,7	98,6	16,1	27,3	58,3*	0,38	0,56	0,41	0,64	0,26	0,50
12	4,0	3,9	104,9	21,5	28,1	76,4*	0,38	0,54	0,43	0,55	0,32	0,42
13	2,9	2,9	99,3	7,7	14,9	51,8**	0,21	0,50	0,25	0,42	0,16	0,28
14	0,7	1,6	44,1*	2,1	8,4	25,0*	0,27	0,52	0,18	0,32	0,12	0,21
15	3,1	3,0	102,0	17,3	21,3	81,4*	0,38	0,53	0,51	0,52	0,33	0,43
16	0,8	1,0	83,0	1,8	4,9	36,7*	0,15	0,46	0,14	0,29	0,11	0,20
17	3,7	3,8	99,2	16,2	24,1	67,3**	0,22	0,43	0,36	0,48	0,28	0,38
18	2,9	3,4	85,5	17,3	19,6	88,3	0,46	0,47	0,48	0,46	0,41	0,38
19	4,2	4,1	101,2	19,3	28,2	68,2**	0,27	0,49	0,40	0,57	0,29	0,39
20	1,9	2,4	79,6	5,5	11,5	47,8**	0,19	0,35	0,20	0,34	0,23	0,39

(1) Del tratamiento testigo sin magnesio (-Mg) con respecto al tratamiento con adición de magnesio (+ Mg).

* Respuesta significativa al 5 por ciento.

** Respuesta significativa al 1 por ciento.

Los valores unidos con una línea son iguales entre sí (95 por ciento de confianza).

so de los suelos con predominio de coloides amorfos. En cambio, la fracción intercambiable arrojó correlaciones positivas y significativas ($P < 0,05$), con las mismas variables. Estos resultados confirman lo explicado anteriormente en el sentido de que, al aumentar las reservas del elemento y su capacidad de reabastecimiento, disminuyen los niveles de disponibilidad inmediata y, consecuentemente, también disminuye la absorción total de magnesio por la planta y su concentración en los tejidos vegetales.

El Mg-total y la fracción de magnesio ligada a los minerales primarios (Mg-estructural) mostraron correlaciones análogas a las obtenidas con el Mg-reserva y Mg-restituído, lo cual resulta lógico si se toma en

cuenta que esas fracciones constituyen también una medida de la reserva del elemento y que relacionaron directa y significativamente con su capacidad de reabastecimiento ($r = 0,61^{**}$ y $r = 0,59^{**}$, respectivamente).

Tanto el Mg-soluble en ácido como el Mg-materia orgánica y el Mg-soluble en agua mostraron correlaciones muy pobres con las variables de respuesta, lo cual implica que estas fracciones tienen poca significación agronómica en el caso de los suelos estudiados.

En cambio, la fracción intercambiable fue la que mejor correlacionó con las variables de la planta, lo cual supone que es la que ofrece un mayor aporte al suministro inmediato de magnesio a la planta.

Indices de disponibilidad y niveles críticos

De acuerdo con los resultados de los análisis de correlación (Tabla 4), ninguna de las relaciones catiónicas consideradas (Ca/Mg; Mg/K; Mg/(K + Mg + Ca)) fueron adecuadas como índices de disponibilidad de magnesio. Otro tanto ocurrió con el pH (en el rango de 5 a 7), con el porcentaje de arcilla y con el contenido de arcilla más limo.

El contenido de carbono orgánico relacionó directamente con el rendimiento relativo de materia seca ($r = 0,60^{**}$) en el grupo de suelos con pH (NaF, 1M) menores de 9,5 y contenido de C-orgánico menor de 10 por ciento, pero la relación fue inversa ($r = -0,75^{**}$) cuando se consideraron los suelos con pH (NaF, 1M) mayores de 9,5 (suelos alófanicos), cuyo contenido de C-orgánico fue mayor del 10 por ciento. En consecuencia, al establecer la relación considerando los dos grupos de suelos, fue significativa y de tendencia cuadrática ($R^2 = 0,67^{**}$) (Fig. 1).

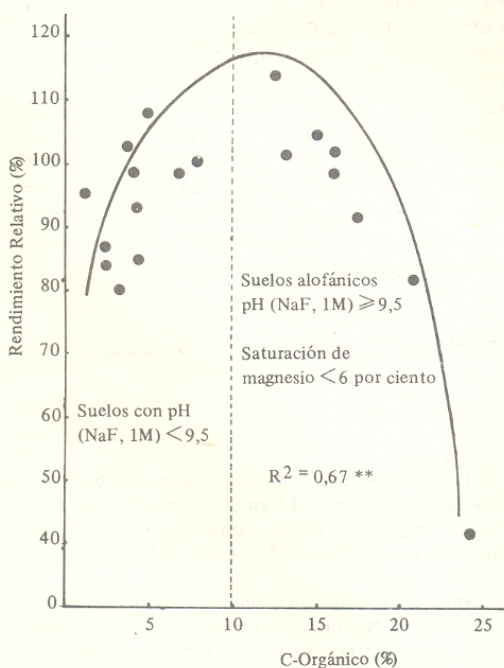


Fig. 1: Efecto del contenido de carbono orgánico sobre el rendimiento relativo de materia seca del raygrass en relación con el contenido de alófana y la saturación del magnesio.

Estos resultados significan, en la práctica, que en los suelos con predominancia de colides amorfos, las probabilidades de obtener respuesta a la aplicación de magnesio aumentan en la medida en que el contenido de C-orgánico se incrementa sobre 10 por ciento. En cambio, en los suelos no alófanicos ocurre lo contrario; es decir, que la probabilidad de respuesta se hace mayor cuando el contenido de C-orgánico es menor del 10 por ciento.

Teniendo en cuenta los coeficientes de correlación lineal, se puede decir que los índices más eficientes para predecir la disponibilidad de magnesio, cuantificada en términos de absorción y concentración en la planta, fueron el Mg-intercambiable y el porcentaje de saturación de magnesio en el complejo de cambio, siendo estas dos variables las seleccionadas como las más importantes en el análisis de correlación lineal múltiple.

El hecho de que la saturación de magnesio sea un factor que ejerce gran influencia sobre la disponibilidad de magnesio, contribuye a explicar el efecto ejercido por el C-orgánico en los suelos alófanicos, ya que en la medida que aumenta el C-orgánico, aumentará la CIC, disminuirá la saturación de Mg y, en consecuencia, su disponibilidad para la planta.

Mediante la técnica gráfica de Cate y Nelson (1971), y utilizando como criterio la absorción relativa de magnesio, se lograron identificar los siguientes niveles críticos: para el Mg-intercambiable entre 1,1 y 1,4 cmol kg^{-1} , y para la saturación de Mg entre 5,1 y 6,4 por ciento.

CONCLUSIONES

- 1) La distribución de las fracciones de magnesio en los suelos estudiados mostró la siguiente secuencia de concentración: Mg-minerales primarios (estructural) > Mg-soluble en ácido > Mg-intercambiable > Mg-unido a materia orgánica > Mg-soluble en agua. Los suelos con predominio de alófana fueron más ricos en Mg-total, en Mg-minerales primarios y en Mg-reserva, pero esta situación no se reflejó en una mayor disponibilidad inmediata del elemento. La fracción de Mg-no cambiable disponible no fue detectable en la mayoría de los suelos y la determinación de Mg-ligado a materia orgánica ofreció mucha dificultad.
- 2) Los suelos estudiados mostraron una alta capacidad de restitución de magnesio intercambiable, siendo mayor en los suelos con predominio de coloides amorfos. El Mg-reserva constituyó una buena medida de esta capacidad en el grupo de suelos alófanicos.
- 3) El Mg-soluble en ácido, el Mg-ligado a la materia

TABLA 4: Coeficiente de correlación lineal entre las variables de respuesta y las fracciones de magnesio y algunas otras características del suelo.

	Rendimiento Relativo				Absorción total de Mg				Absorción relativa de Mg				Concentración Mg en primer corte			
	pH NaF \geq 9,5		pH NaF < 9,5		pH NaF \geq 9,5		pH NaF < 9,5		pH NaF \geq 9,5		pH NaF < 9,5		pH NaF \geq 9,5		pH NaF < 9,5	
	20 suelos		20 suelos		20 suelos		20 suelos		20 suelos		20 suelos		20 suelos		20 suelos	
Mg-total	-0,2772	-0,6044*	0,3361	-0,4421*	-0,8191**	0,6267*	-0,6292**	0,8075**	0,7650**	-0,5320*	-0,7104*	0,3718	-0,7104*	0,3718	-0,5320*	0,3718
Mg-minerales primarios	-0,3331	-0,6041*	0,2833	-0,2094	0,6223*	0,7191*	-0,3096	-0,8180**	0,8156**	-0,5346*	-0,7439*	0,4474	-0,7439*	0,4474	-0,5346*	0,4474
Mg-soluble en ácido	0,2911	0,4085	0,3531	-0,0188	0,4272	-0,2200	0,0908	0,5520	-0,1700	-0,2731	0,4273	-0,5847*	0,4273	-0,5847*	0,4273	-0,5847*
Mg-unido a materia orgánica	0,4135*	0,4571	0,4106	0,1450	0,3986	-0,1455	0,1291	0,4602	-0,4038	-0,1022	0,2915	-0,4214	0,2915	-0,4214	0,2915	-0,4214
Mg-intercambiable	0,2234	0,3842	-0,0992	0,4308*	0,6075*	0,2875	0,6365**	0,6363*	0,7604**	0,4878**	0,8476**	0,5373*	0,8476**	0,5373*	0,4878**	0,5373*
Mg-inter. (rápido pH:7)	0,2886	0,4642	-0,2146	0,5071*	0,7388*	0,2758	0,6611**	0,7060*	0,7619**	0,5067*	0,8959**	0,5880*	0,8959**	0,5880*	0,5067*	0,5880*
Mg-intercambiable (pH:1)	0,1987	0,4730	-0,2150	0,4755*	0,7180*	0,2446	0,6690**	0,7147*	0,7704**	0,5151*	0,9025**	0,5704*	0,9025**	0,5704*	0,5151*	0,5704*
Mg-reserva	-0,5156*	-0,7555*	-0,0409	-0,5152*	-0,7230*	-0,5199	-0,4896*	-0,6865*	-0,1200	-0,5517*	-0,3372	-0,2301	-0,3372	-0,2301	-0,5517*	-0,2301
Mg-restitución	-0,4425*	-0,7131*	-0,1716	-0,3728	-0,7045*	-0,1172	-0,3880*	-0,6379*	-0,0033	-0,5499*	-0,4382	-0,0419	-0,4382	-0,0419	-0,5499*	-0,0419
Mg-soluble en agua	0,0774	0,4488	-0,2903	0,1832	0,2288	0,1149	0,4394*	0,3670	0,5381*	0,3460	0,3885	0,2872	0,3885	0,3460	0,3885	0,2872
% saturación (CCC pH:7)	0,1799	0,5562*	-0,3091	0,4164*	0,8264**	0,2330	0,5615**	0,7794*	0,5106	0,8588**	0,8993**	0,7542**	0,8993**	0,7542**	0,8588**	0,7542**
% saturación (CCC efectivo)	0,1803	0,3243	-0,1633	0,4566*	0,5777	0,3132	0,3540	0,4840	0,4689	0,6484**	0,6858*	0,6349*	0,6858*	0,6349*	0,6484**	0,6349*
Relación Ca/Mg	-0,2146	-0,2017	-0,1981	-0,2235	-0,3790	0,0294	-0,1009	-0,3104	0,4101	-0,2897	0,5076	0,1033	-0,2897	0,5076	0,1033	0,1033
Relación Mg/K ag (1)	0,1083	0,1732	0,0527	0,0924	-0,0651	0,0662	0,3926*	-0,0183	0,6187*	0,5278*	0,0252	0,4517	0,5278*	0,0252	0,4517	0,4517
Relación Mg/K	0,0944	0,1309	0,0888	-0,0237	-0,1273	-0,1014	0,2783	0,0837	0,3940	0,3956*	-0,0639	0,2916	0,3956*	-0,0639	0,2916	0,2916
Relación Mg/K + Mg + Ca	0,1135	-0,1188	0,3155	-0,0082	-0,1895	-0,0397	-0,1099	-0,1382	-0,3822	0,2663	0,0337	-0,1309	0,2663	0,0337	-0,1309	-0,1309
Relación K ag/Ca + Mg	-0,1457	-0,1423	0,0737	-0,0372	0,2670	-0,3416	-0,2375	0,0899	-0,8531**	-0,4417*	0,1885	-0,7253*	-0,8531**	0,1885	-0,4417*	-0,7253*
pH: agua	-0,1832	0,0651	-0,4892	0,0686	0,5376	-0,1307	0,3072	0,3763	0,3744	0,2931*	0,7102*	0,2898	0,2931*	0,7102*	0,2898	0,2898
Carbon orgánico	-0,2857	-0,7548*	0,6084*	-0,2426	-0,6840*	0,2240	-0,3577	-0,7414*	0,0794	-0,5811**	-0,3901	-0,3612	-0,5811**	-0,3901	-0,3612	-0,3612
% arcilla	0,2369	0,4318	0,0924	-0,1630	0,3881	-0,2786	0,1003	0,4821	-0,2987	-0,3129	0,5008	-0,6409*	-0,2987	0,5008	-0,3129	-0,6409*
% arcilla + limo	-0,0254	-0,0712	0,0603	-0,0364	-0,0592	0,0333	-0,1440	-0,1244	-0,1090	-0,2406	0,0357	-0,3872	-0,1090	-0,2406	0,0357	-0,3872

(1) K ag: K inicial + el agregado como fertilizante.

* Nivel de significancia 10 por ciento.

** Nivel de significancia 5 por ciento.

*** Nivel de significancia 1 por ciento.

- orgánica y el Mg-soluble en agua ofrecieron escasa significación agronómica, al correlacionar pobremente con las variables de la planta. La fracción de Mg-intercambiable fue la que mostró mayor participación en el suministro de Mg a la planta.
- 4) Las relaciones catiónicas consideradas (Ca/Mg, Mg/K; Mg/(K + Mg + Ca) no fueron adecuadas como índices de disponibilidad del magnesio. Otro tanto se puede decir del pH (en el rango de 5 a 7), del porcentaje de arcilla y del contenido de arcilla y de limo. Los índices más eficaces para predecir la absorción y la concentración del Mg en la planta, fueron el porcentaje de saturación de Mg en el complejo de cambio y el Mg-intercambiable. Los límites críticos estuvieron entre 5,1 y 6,4 por ciento y entre 1,1 y 1,4 cmol kg⁻¹, respectivamente.
 - 5) El contenido de C-orgánico constituyó un índice adecuado para predecir la respuesta de la planta a la fertilización con magnesio, en términos de rendimiento de materia seca. En los suelos con predominio de coloides amorfos el comportamiento del C-orgánico en relación a la disponibilidad del elemento, parece resultar de su efecto sobre la CIC y la saturación de magnesio.
 - 6) Los suelos alofánicos (pH NaF, 1M \geq 9,5), aunque con mayores reservas del elemento a largo plazo y más altos valores en su capacidad de reabastecimiento, evidenciaron menores niveles de disponibilidad y mayores probabilidades de respuesta a la fertilización con magnesio.

REFERENCIAS

- Alston, A. M., 1972. Availability of magnesium in soils. *J. Agric. Sci.* 79: 197-204.
- Cate, R. B. and L. A. Nelson, 1971. A simple statistical procedure for partitioning Soil test correlation data into two classes. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 35: 658-660.
- Chamorro, G., 1977. Fraccionamiento del magnesio en suelos del Valle del Cauca y Sabana de Bogotá, Bogotá. Universidad Jorge Tadeo Lozano, Facultad de Agrología, 66 p.
- Christenson, D. E.; R. P. White and E. C. Doll, 1973. Yields and magnesium uptake by plants as affected by soil pH and calcium levels. *Agronomy J.* 65: 205-206.
- Fassbender, H. W., 1975. Química de suelos; con énfasis en suelos de América Latina. Turrialba, Costa Rica, IICA AID, p. 355-358.
- Guerrero, M. R., 1965. Suelos de Colombia y su relación con la séptima aproximación. Bogotá. IAGAC, 196 p.
- Lombin, L. G., 1979. Evaluation of the magnesium supplying powers of the Nigerian Sayannah soils. *Soil Sci. and Plant Nutrition* 25: 477-492.
- Lombin, L. G. and A. A. Fayemi, 1976. Release of exchangeable and nonexchangeable magnesium from Nigerian soils on cropping with maize of chemical extraction. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 27: 101-108.
- Mejía, C. L., 1967. Principales características físicas, químicas, mineralógicas y micromorfológicas de los suelos de la cuenca alta del Río Bogotá/Clasificación tentativa en el Sistema de la séptima aproximación. Bogotá. IGAC - Subdirección Agrológica, 1967, s.p.
- Mokwunye, A. U. and S. W. Melsted, 1972. Magnesium forms in selected temperate and tropical soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 36: 762-764.
- Mokwunye, A. U. and S. W. Melsted, 1973. Magnesium fixation and release in soils of temperate and tropical origins. *Soil Sci.* 116: 359-362.
- Mostafa, M. A. E. and A. Ulrich, 1976. Interaction of calcium and magnesium in nutrition of intact sugar beets. *Soil Sci.* 121: 16-20.
- Salmon, R. C., 1964. Cation-activity ratios in equilibrium soil solutions and the availability of magnesium. *Soil Sci.* 98: 213-221.
- Salmon, R. C. and P. W. Arnold, 1963. The uptake of magnesium under exhaustive cropping. *J. Agric. Sci.*, 62: 421-425.
- Tellez, C. O., 1977. Estudio del magnesio en varias series de suelos de la Sabana de Bogotá, Bogotá, Universidad Jorge Tadeo Lozano, Facultad de Agrología, 66 p.