

## CAPITULO VI

### LOS ELEMENTOS SECUNDARIOS

Dentro de los elementos mayores, el calcio (Ca) y el magnesio (Mg) junto con el azufre (S) integran un grupo denominado "elementos secundarios", pues a pesar de que las plantas lo requieren en cantidades relativamente altas, su deficiencia en los suelos es menos común. Por otra parte, estos elementos son adicionados al suelo en cantidades relativamente altas, ya sea como materiales de encalado (calcio y magnesio) o como mejoradores de la fertilidad del suelo en suelos alcalinos (azufre, y calcio).

#### 6.1 EL CALCIO Y MAGNESIO.

El calcio es un nutrimento esencial para el crecimiento de las plantas. Los animales tienen que encontrar en sus alimentos las cantidades de calcio que necesiten, en asociación con el fósforo para la formación de su esqueleto. Un contenido insuficiente de los alimentos en calcio y fósforo pueden provocar enfermedades óseas como el raquitismo.

La importancia del calcio en la fertilidad del suelo es doble : directo en la planta e indirecto en el suelo. En ésta toma parte en todos los procesos físico-químicos y biológicos que en él ocurren. Los efectos sobre las plantas son muy amplios. Solamente por vía de ilustración mencionaremos algunos de los procesos en los cuales interviene :

- Se le ha relacionado con la síntesis de las proteínas ya que promueve la absorción del nitrógeno en la forma de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ).
- Neutraliza las toxinas producidas en la planta.
- Influye en la absorción de otros nutrimentos.
- Está presente en la pared celular como pectato de calcio, en la lamina media.

Es necesario para el crecimiento de los meristemos apicales. En ausencia de calcio, las divisiones mitóticas son anormales o nulas.

El Mg es el único constituyente mineral de la molécula de la clorofila y está localizado en la parte central. Parece que está relacionado al metabolismo del fósforo y se considera que es específico en la activación de numerosos sistemas enzimáticos.

#### 6.1.1 Formas y Cantidad en los Suelos.

El Ca y el Mg existen en muchas formas en los suelos. Pueden estar en forma intercambiable en el complejo coloidal o en forma soluble en la solución del suelo, como nitratos, bicarbonatos, cloruros o sulfatos. En regiones áridas se encuentran en gran proporción en la forma de carbonatos y en los suelos ácidos bajo determinadas condiciones, en la forma de sulfatos, especialmente el calcio.

En el suelo el Ca puede existir en muchas formas, pero para fines de nutrición de las plantas las formas principales son el Ca en la solución del suelo, el Ca intercambiable y el Ca activo. Esta última fracción según Duchaufour citado por Gabdan y colaboradores (10) son las partículas finas de carbonatos solubles en aguas cargadas de  $\text{CO}_2$ . En estas condiciones se forman bicarbonatos que ceden el Ca al complejo adsorbente del suelo, quedando como Ca intercambiable.

Los principales minerales que contienen Ca, son las feldespatos como la anordita ( $\text{Ca Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_8$ ). También contienen Ca los piroxenos, anfíboles y apatitas. El Mg de los suelos se origina de la descomposición de las rocas que contienen minerales, tales como la biotita, la serpentina y la olivina. La dolomita es un mineral que contiene carbonatos de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), y carbonato de magnesio ( $\text{MgCO}_3$ ), en diferentes proporciones.

El Mg constituye aproximadamente el 1.93 por ciento de la corteza terrestre. Los límites son demasiado amplios; van desde menos de 1 por ciento en suelos arenosos de regiones húmedas hasta varios porcientos en

suelos de textura fina, en suelos de regiones áridas o semiáridas, formados a partir de material parental con alto contenido de Mg.

El contenido de Mg total de los suelos no calcáreos varía entre 0.1 y 1 por ciento. En los suelos calcáreos se encuentra Mg nativo en forma de dolomita ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{Mg CO}_3$ ) y magnesita ( $\text{Mg CO}_3$ ) aumentando su contenido de MgO total hasta 2 y 3 por ciento. En algunos suelos alcalinos de zonas desérticas y semidesérticas ocurren acumulaciones de  $\text{Mg SO}_4$  (8).

Los suelos varían ampliamente en el contenido de Ca. En suelos libres de  $\text{CaCO}_3$ , se han encontrado contenidos que varían desde 0.088 por ciento hasta un poco más del 2 por ciento. En suelos calcáreos varía desde menos de 1 por ciento a 25 por ciento. Los suelos arenosos de regiones húmedas son frecuentemente bajos en Ca total (8).

Los suelos derivados de cenizas volcánicas han sido estudiados con notoria atención en los últimos años, y en relación con el Ca no han sido excepción. Según Gabdán, Blasco y Guerrero (10), algunos suelos volcánicos del Atliplano de Pasto contienen en promedio 9.660 ppm de Ca total, 5.974 ppm de Ca activo, 518 ppm de Ca intercambiable y cantidades insignificantes de Ca soluble en agua. Por otra parte Parra y Gamboa (27) efectuaron el fraccionamiento del Ca en suelos volcánicos del Altiplano de Ipiiales, con los resultados que se presentan en la Tabla 24.

TABLA 24. Concentración promedio (ppm) de las distintas fracciones de Ca en el Altiplano de Ipiiales (27).

Muestra de	Ca total <sup>1/</sup>	Ca Activo	Ca Inactivo <sup>2/</sup>	Ca intercam.	Ca soluble
Suelo	14.157	6.269	8.679	1.939	247
Sub-Suelo	12.636	7.659	4.975	1.978	165

<sup>1/</sup> El Ca-total se determinó fundiendo el suelo con carbonato de sodio anhidro y disolviendo la masa formada con HCl.

<sup>2/</sup> El Ca-inactivo es la diferencia entre el Ca-total y el Ca-activo. El Ca-inactivo se encuentra en la fracción más gruesa de los suelos.

De los resultados presentados en la Tabla 24 los autores (27) destacaron los siguientes hechos:

- a. En el Altiplano de Ipiiales el Ca-total se encuentra en concentraciones promedias altas, tanto en el suelo como en el subsuelo (14.157 y 12.636 ppm respectivamente). Estos promedios superan a los obtenidos para el Altiplano de Pasto.
- b. El Ca-activo se presentó en menores concentraciones en el suelo que en el subsuelo. Lo contrario ocurrió con el Ca-inactivo. La menor concentración de Ca-activo en el primer horizonte puede explicarse teniendo en cuenta la dinámica de este elemento en el suelo. Es posible que la forma activa haya pasado paulatinamente a Ca-intercambiable, que bien pudo ser tomado por las plantas o ser llevado a horizontes más profundos, en este caso el subsuelo. Tanto el alto porcentaje de arenas como la presencia de alofana, facilita enormemente la pérdida de lixiviación.
- c. Las concentraciones del Ca-intercambiable se consideran como medianas, siendo el Ca-soluble de mediano a bajo.
- d. Puede existir respuesta de los cultivos al encalamiento en estos suelos, dado que la forma inactiva es mayor que la forma activa.

Distintas investigaciones han demostrado que el encalamiento de los suelos volcánicos, a diferencia de lo que ocurre en suelos ácidos de fracción arcillosa cristalina, no origina en muchos casos un aumento significativo de la producción vegetal. Parece que aunque las concentraciones del Ca-intercambiable sean bajas en ciertos suelos volcánicos el porcentaje de Ca-activo llega a ser bastante elevado, lo cual es, posiblemente otra causa explicativa del comportamiento de la cal en esos suelos. Los autores (27) recomiendan que en los análisis rutinarios de suelos, se debería involucrar la fracción activa del Ca del suelo, para conocer la reserva y la dinámica del Ca en los suelos. Esta determinación es muy común en los países de Europa.

En relación con el contenido de Ca y Mg intercambiable en las tres cordilleras andinas colombianas, Rodríguez (32) encontró que este era sensiblemente igual en las tres cordilleras. En efecto los promedios son de 6,9; 7,0 y 6,7 meq/100 g, para el Ca, y de 2,4; 2,1 y 1,6 meq/100 g, para el Mg, en los suelos de las cordilleras Occidental, Central y Oriental respectivamente. Sin embargo, por los datos citados, no debe desconocerse las diferencias que se registran cuando se comparan áreas pequeñas y definidas como sería por ejemplo los suelos de Quindío situados en la Cordillera Central, con los suelos de Moniquirá, situados sobre la cordillera Oriental, o si se comparan las distintas vertientes de las cordilleras, como se observa en la Tabla 25.

TABLA 25. Contenidos promedios de Ca y Mg intercambiable en las vertientes de las cordilleras Occidental, Central y Oriental (32).

Ca - Mg (meq/100 g)	Cord.Occidental		Cord. Central		Cord.Oriental	
	Vert. Occid.	Vert. Orient.	Vert. Occid,	Vert. Orient.	Vert. Occiden.	Vert. Orient.
Ca	8,9	5,0	6,0	8,0	4,1	9,4
Mg	2,8	2,0	1,7	2,5	1,5	1,8

Finalmente si se comparan los contenidos de Ca y Mg, dentro de una misma vertiente, se encuentran mayores variaciones que entre vertientes de una misma cordillera, como se anota en la Tabla 26. Lo anterior es tan importante que es necesario enfatizar que el contenido de Ca y Mg pueden diferir apreciablemente en fincas vecinas, especialmente en las cultivadas. Las diferencias específicas solamente se pueden detectar por medio de un análisis de suelos.

En cuanto al contenido de calcio y magnesio intercambiable en los suelos colombianos de la figura 17, se pueden hacer las siguientes consideraciones:

TABLA 26. El contenido de calcio intercambiable en dos regiones de la vertiente Occidental de la Cordillera Central (32).

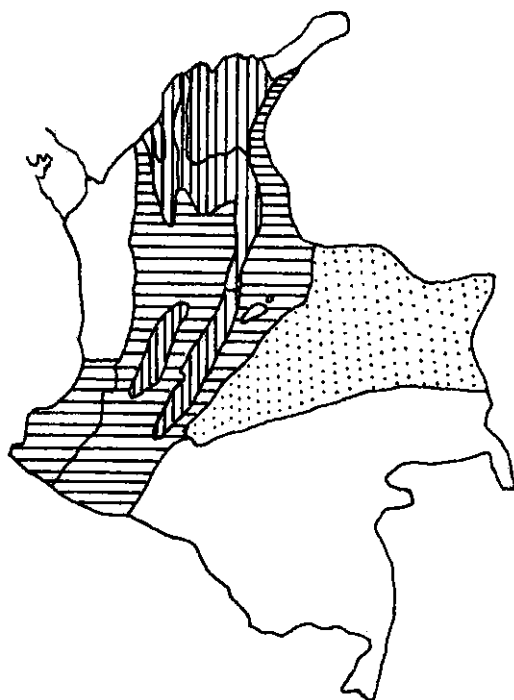
mg/100 g de suelo	Vertiente - Occidental	
	Chinchiná (Caldas)	Quindío
Ca	2.83	7.75
Mg	0.57	5.91

- El calcio y el magnesio intercambiables son extremadamente bajos en suelos de la Costa del Pacífico, los Llanos Orientales (suelos de Sabana) y la región Amazónica.
- Existe en cantidades bajas a medianas en las cordilleras Andinas, exceptuando los suelos aluviales en donde pueden ser altas.
- Cantidades relativamente altas tienen los valle de los ríos Cauca, Sinú, Cesar y el Valle del Alto Magdalena.
- Cantidades muy altas se encuentran en suelos de la Costa Atlántica y el desierto de la Guajira.

#### 6.1.2 Factores que Afectan la Aprovechabilidad del Ca y el Mg por las plantas.

La aprovechabilidad del Ca y el Mg por las plantas está afectada por la reacción del suelo, su saturación en el complejo de intercambio catiónico, el tipo de coloides, la naturaleza del ión complementario y el tipo de planta.

- a. El tipo de arcilla y el porcentaje de saturación de bases.






BAJO		Menos del 10% de las muestras analizadas dieron pH inferior a 5,5
MEDIANO		10-35% de las muestras analizadas dieron pH inferior a 5,5
ALTO		Más del 70% de las muestras analizadas dieron pH inferior a 5,5

Figura 17. Requerimientos de cal en los suelos de Colombia  
(Banco de datos Programa de Suelos ICA)

La cantidad absoluta de Ca y Mg intercambiable en los suelos no es tan importante para la nutrición de las plantas, como su proporción relativa con las cantidades y clases de otros cationes retenidos en el complejo de intercambio o el grado de saturación de bases. Así, un suelo que contiene solamente 2.000 kilogramos de Ca intercambiable por hectárea, pero con una CIC baja, puede proporcionar más Ca a las plantas que en un suelo que contiene 8.000 kilogramos de Ca por hectárea pero con una CIC alta.

Analicemos, por ejemplo los datos presentados en la Tabla 27. El suelo de la serie 130C-5 del Tolima tiene menor cantidad de Ca intercambiable que el suelo de la serie Tibaitatá. Sin embargo el Ca aprovechable para las plantas es mayor en el primer suelo que en el segundo, pues mientras el porcentaje de saturación de Ca es de 36 en el suelo Tibaitatá lo es de 50 en el suelo del Tolima. El grado de saturación de Ca es muy importante porque la cantidad de este elemento adsorbida en forma intercambiable proporcionalmente disminuye a medida que la CIC aumenta y así la cantidad de Ca absorbido por la planta disminuye.

TABLA 27. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) y el porcentaje de saturación con Ca en dos suelos que difieren en el pH (21).

Características	S U E L O S	
	Serie Tibaitatá	Serie 130C-5
pH	5,0	6,5
Ca (meq/100 g)	9,7	4,2
CIC	27,0	8,4
Ca (% de saturación)	36	50

El tipo de arcilla también influye en la aprovechabilidad del calcio por las plantas. Las arcillas del tipo 2:1 requieren mayor grado de saturación con calcio que las del tipo 1:1. Las primeras requieren una saturación del 70 por ciento o más, para que este elemento sea liberado fácilmente

y pueda ser absorbido por las plantas. En las arcillas de tipo 1:1 con una saturación del 40 al 50 por ciento, el Ca puede liberarse fácilmente y ser aprovechable para las plantas (37).

Allaway (1) encontró que el grado de aprovechabilidad del calcio por la soya fue del orden: caolinita > illita > montmorillonita. En cada coloide la aprovechabilidad del calcio aumentó con el incremento en la saturación de Ca. El Ca absorbido por la soya estuvo estrechamente relacionado con la cantidad desplazada por HCl diluido. Los resultados sugirieron que los suelos con diferentes tipos de coloide pueden mostrar diferencias marcadas en la aprovechabilidad del calcio reemplazable el cual puede extraerse con una solución diluida de HCl que ofrece una medida muy promisorias de la fertilidad del suelo en cuanto a calcio.

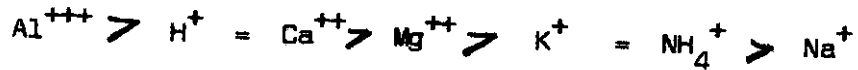
b. El efecto del ión complementario.

Hay un fenómeno que afecta la población de iones en la solución del suelo. Se conoce como "el efecto del ión complementario" y se define como "la influencia de un ión adsorbido en la superficie coloidal sobre la liberación de otros iones adsorbidos en la misma superficie".

Ratner desde 1938 citado por Black (5) demostró este fenómeno midiendo el rendimiento y contenido de calcio en plántulas de trigo cultivadas en suelos con igual saturación de calcio y diferentes cationes complementarios. Los resultados se presentan en la Tabla 28.

La absorción de Ca por las plantas de trigo, fue mayor con el ión  $H^+$  que con los iones  $Mg^{++}$  o  $Na^+$ , como cationes complementarios. En relación con el ión complementario es importante anotar los siguientes hechos (37):

- Los coloides del suelo tienden a retener más fuertemente los cationes divalentes ( $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ) que los monovalentes ( $K^+$ ,  $Na^+$ ). En general el orden de energía con la cual son adsorbidos los cationes por el coloide, se llama serie liotrópica y se expresa como sigue :



- Si los cationes intercambiables de un suelo consisten principalmente de cantidades altas de iones  $\text{K}^+$  y  $\text{NH}_4^+$  en proporción a los divalentes  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$ , los iones monovalentes serán reemplazados más fácilmente del complejo coloidal que los divalentes. De ahí que en éstas condiciones la absorción por las plantas de los primeros sean mayor que la adsorción de los segundos. En casos extremos puede ocurrir deficiencia de éstos últimos.
- La adición de cantidades apreciables de  $\text{K}^+$  al suelo, y quizás también de  $\text{NH}_4^+$ , puede resultar en una gran disminución de la absorción de  $\text{Ca}^{++}$  por las plantas, en suelos con baja saturación de este catión, como son los suelos extremadamente ácidos.
- En consecuencia la presencia de grandes cantidades de  $\text{K}^+$  y quizás también de  $\text{NH}_4^+$ , resulta en disminución de la absorción de  $\text{Mg}^{++}$  por las plantas. Los rumiantes que pastorean en tales suelos sufren deficiencias de Mg conocida como "tetano de los pastos" ó "hipomagnesia". Obviamente la corrección consiste en aumentarr el porcentaje de saturación con Mg adicionando al suelo cal dolomítica, en el caso de suelos ácidos, o fertilizantes que contengan Mg en suelos ligeramente neutros.

En suelos con buenas cantidades de K aprovechable, las plantas tienden a tomar más del necesario (consumo de lujo) reduciéndose por lo tanto la proporción de Mg absorbido por las plantas. En casos de excesivas cantidades de K, el Mg puede ser virtualmente excluído.

López (17) en un suelo franco-arenoso de la serie chinchiná encontró que el poder de reemplazamiento catiónico, de los cationes aplicados en los compuestos  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{MgCO}_3$  y  $\text{CaCO}_3$  al suelo guardó la siguiente relación:  $\text{NH}_4^+ > \text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++} > \text{K}^+$ . Los datos indicaron para estos suelos, un poder de reemplazamiento alto para el ión  $\text{NH}_4^+$ , medio para el  $\text{Ca}^{++}$  y el

$Mg^{++}$  y bajo para el  $K^+$ .

Lotero y Monsalve (18) y Ramírez y Lotero (31) en un suelo aluvial del Valle de Medellín, al hacer aplicaciones masivas y continuas de úrea ( $NH_2 - CO - NH_2$ ) y sulfato de amonio ( $NH_4 - SO_4 - NH_4$ ) encontraron que estas fuentes incrementaron considerablemente el aluminio intercambiable ( $Al^{+++}$ ) y disminuyeron el  $Ca^{++}$ , el  $Mg^{++}$  y el  $K^+$  intercambiables. En este estudio hubo una secuencia de reemplazamiento de los iones por efecto de las aplicaciones de úrea y del sulfato de amonio, en orden decreciente así:  $Ca^{++} > Mg^{++} > K^+ > Na^+$ .

Muchos investigadores se han ocupado del estudio de las proporciones que deben guardar las bases Ca, Mg y K en los suelos, para facilitar el óptimo crecimiento de las plantas. Parece que la relación más adecuada para la mayoría de los cultivos es de 2:1 y aparentemente existen relaciones óptimas para cada cultivo cuando se trata de las relaciones Ca:Mg y K.

Bear y Toth (4) indicaron que el porcentaje de saturación de los cationes Ca, Mg y K en los coloides del suelo, es más importante que la relación Ca:Mg. Estos investigadores encontraron un porcentaje de saturación óptimo para la alfalfa de 65 por ciento de Ca, 10 por ciento de Mg y 5 por ciento de K. León (16) trabajando con suelos de la Meseta de Popayán, encontró que la mejor relación Ca:Mg:K para el crecimiento de la alfalfa, era de 2:1:0,27.

### 6.1.3 La Relación Ca/Mg.

Uno de los problemas más comunes en los suelos colombianos, es el de la relación Ca/Mg en el complejo coloidal de los suelos. En suelos de la meseta de Popayán donde la relación Ca/Mg es, en estado natural amplio, Baird y Vanegas (3) constataron deficiencias de Mg en esos suelos. Por otra parte, en suelos del Valle del Río Cauca en donde la relación es estrecha o menor que la unidad, se ha encontrado mala producción en cultivos como el arroz, la caña de azúcar y pastos.

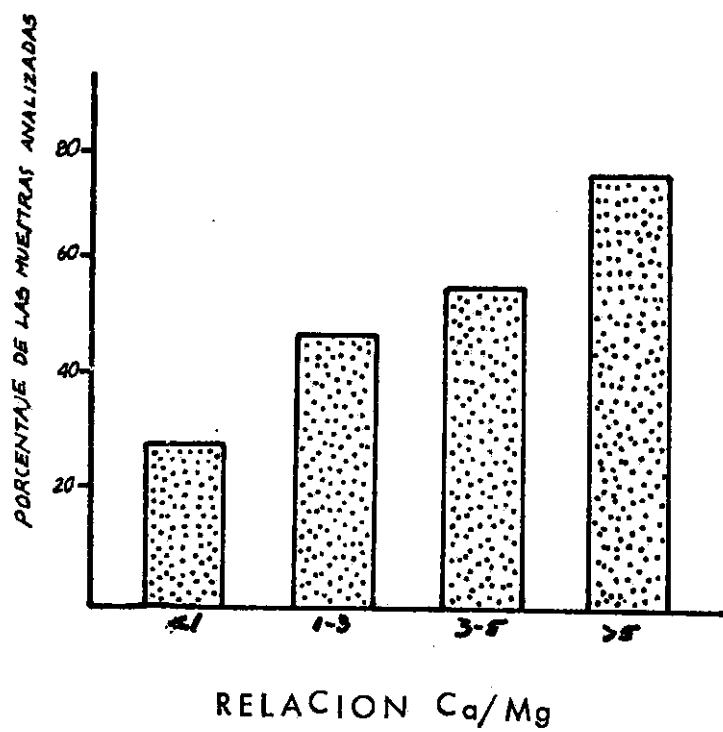


Figura 18. Distribución de los valores de la relación Ca/Mg en suelos de las regiones de clima frío de Colombia (Banco de datos Programa de Suelos ICA).

Normalmente se espera que un suelo tenga más Ca que Mg en el complejo de cambio, o sea que la relación Ca/Mg sea superior a la unidad. Lipman citado por León (16) sostiene que posiblemente existe una relación Ca/Mg óptima para cada cultivo o grupo de cultivos y Loew citado por el mismo autor, cree que la mayoría de los cultivos se adaptan bien a la relación 2:1.

a. La relación Ca/Mg amplia. En los trabajos realizados por el Programa de Suelos del ICA en la Granja Experimental "El Placer" de la Secretaría de Agricultura del Cauca, en suelos bien drenados, altamente lixiviados y extremadamente ácidos, se encontró que si se hacían aplicaciones altas de cal en forma de  $\text{CaCO}_3$  y se añadían los nutrimentos principales N, P, K, los rendimientos de las cosechas continuaban generalmente bajos. En la tabla 28 se presentan algunas características de los suelos de la Meseta de Popayán, donde se realizaron experimentos de fertilización de papa, trigo y frijol y se encontraron respuestas muy pronunciadas al Mg.

TABLA 28. Algunas propiedades de los suelos de la Meseta de Popayán (3).

Profundidad cm	Textura	pH	P ppm Olsen	M.O. %	Ca	Mg	K	CIC
					meq/100 g de suelo			
0 - 20	F.arenoso	4.9	5.1	9.0	2.0	0.7	1.1	25.0
20 - 40	Arcillo-arenoso	5.1	2.2	3.6	2.5	1.2	0.5	20.7

Con anterioridad al establecimiento de los ensayos, el suelo se le agregó cal agrícola (carbonato de calcio) a razón de 5 toneladas por hectárea, incorporándola en los primeros 20 cm de la capa superficial. En esta forma la relación Ca:Mg se amplió aún más. Los resultados obtenidos mostraron que tanto la papa como el frijol, respondieron significativamente a la aplicación de 200 kg/Ha de sulfato de magnesio ( $\text{MgSO}_4$ ) y hubo una fuerte tendencia del trigo a responder a este elemento. El rendimiento del frijol fué esencialmente nulo cuando se omitió al magnesio de los tratamientos.

Los resultados anteriores se deben tener en mente, ya que es una costumbre muy difundida aplicar cal a los suelos extremadamente ácidos de las regiones húmedas, sin efectuar ensayos previos para probar la bondad de ésta práctica, No obstante que se conocen muchos efectos benéficos del encalamiento en suelos extremadamente ácidos, como el de neutralizar los efectos tóxicos del Al y del Mn y aumentar la aprovechabilidad de otros nutrientes, también pueden causar disturbios en la fertilidad del suelo, como por ejemplo, el desbalanceamiento de la relación Ca/Mg provocando en muchos casos una deficiencia de Mg en las plantas.

b. La relación Ca/Mg invertida. La literatura sobre casos en que las cantidades de Mg intercambiable en los suelos son más altas que las del Ca, o sea aquellas casos en los cuales la relación Ca/Mg es inferior a la unidad, es muy escasa. La relación Ca/Mg invertida puede provocar una absorción anormalmente alta de Mg y en tal caso puede presentarse síntomas de toxicidad de Mg, más bien que de deficiencias de Ca.

Hajduck y Hauskrecht (12) sostuvieron que los suelos magnésicos se caracterizan por antagonismo entre cationes, especialmente Ca y Mg, por condiciones físicas desfavorables y por reacciones alcalinas. Estos investigadores aconsejan para estos suelos, entre otras cosas, aplicaciones de K y la siembra de plantas resistentes a ésta condición, como el maíz y la remolacha azucarera.

En muchas áreas de Colombia se han encontrado suelos con una relación Ca/Mg invertida, especialmente en el valle geográfico del río Cauca y en suelos rojos de Antioquia, ejemplo de los cuales se presentan en la Tabla 29. Según Rodríguez y McClung (33), el alto contenido de Mg en los suelos de Antioquia puede atribuirse al mineral serpentina.

En los suelos del Valle del Cauca, donde la relación Ca/Mg es invertida, se ha encontrado mala producción de cultivos como el arroz, la caña de azúcar y los pastos. Sin embargo, Gómez y colaboradores (11) en base a los datos obtenidos en 56 pruebas regionales de fertilización del maíz,

no encontraron ningún efecto desfavorable de la relación Ca/Mg entre los límites 0,6 a 3,2. Igualmente Rolong y Ramírez (34) tampoco encontraron efecto desfavorable en el crecimiento del sorgo cultivado en suelos con relación Ca/Mg invertida. Los cultivos sensibles presentan síntomas visuales similares a aquellos encontrados cuando crecen en suelos alcalinos. Según Russel (35), los suelos que contienen una elevada proporción de Mg de cambio, tienen una permeabilidad reducida y las plantas contienen menos cantidad de Ca, comparadas con plantas normales. A presiones osmóticas altas e iguales, los iones de Mg son más tóxicos que los iones de Na, pero, tienen en el suelo propiedades análogas a las que imparte un exceso de Na.

TABLA 29. Relación Ca/Mg de uno o menos en algunos suelos del Valle del Cauca y Antioquia (24).

Finca	Municipio	pH	meq/100 g		Relación Ca/Mg
			Ca	Mg	
Holanda	Buga	7.0	26.5	26.5	1.0
Rio Paila	Zarzal	6.3	17.5	19.0	0.92
C.N.I.A. P.	Palmira	6.9	15.5	20.1	0.77
San Carlos	Tuluá	7.7	10.8	28.6	0.38
La Holanda	Jamundi	5.6	8.1	12.5	0.65
Tulio Ospina	Bello	5.9	4.7	9.1	0.52
Machado	Bello	5.5	2.9	3.1	0.94

Mantilla y León (19) hicieron un estudio preliminar de algunas propiedades físicas, químicas y mineralógicas de cinco perfiles de zonas del Valle del Cauca, afectadas por la inversión de la relación Ca:Mg. Encontraron que las arcillas predominantes eran la montmorillonita, la vermiculita e illita. La saturación de Mg en el complejo de cambio osciló entre 50 y 75 por ciento y la saturación del Ca por debajo del 45 por ciento.

En un estudio posterior los mismos autores (20) trataron un suelo de las características enunciadas antes, con yeso y cloruro de potasio en mezclas con otras sales que contenían iones  $\text{NH}_4^+$  ó  $\text{Ca}^{++}$ , con el objeto de observar su efecto en el desplazamiento del Mg y el Na de cambio y en algunas propiedades físicas del mismo. Mediante los resultados de análisis de los suelos y tratados y de las aguas de lavado, recogidas durante 66 días, se concluyó que las adiciones de yeso sin mezclar con otras sales, produjeron resultados favorables en cuanto a adsorción de Ca, desplazamiento de Mg e incremento de la permeabilidad (Tabla 30). Cuando se incorporó yeso mezclado con  $\text{SO}_4(\text{NH}_4)_2$  se presentó mayor desplazamiento de Mg y Na de cambio, comparado con los demás tratamientos, y por tanto mejoró notablemente la permeabilidad. Lavado de suelos sin adición de correctivos aumentaron notoriamente el Mg y Na intercambiable. Estos lavados no parecen mejorar la mala permeabilidad del suelo, debida en parte a la dispersión producida por la alta saturación de Mg intercambiable.

TABLA 30. Contenido de Ca y Mg intercambiables en un suelo con relación Ca:Mg invertida, tratado con diferentes correctivos después de 66 días de lavado con agua (20).

Tratamiento	Ca	Mg	Ca:Mg
	msq/100 g	de suelo	
Testigo	12,6	40,0	0,30
Yeso ( $\text{CaSO}_4$ )	18,2	35,4	0,52
Yeso + $\text{KNO}_3$	20,0	35,5	0,54
Yeso + $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	18,4	33,6	0,55
$\text{CaCl}_2$	17,0	39,0	0,44
$\text{CaCl}_2$ + $\text{KNO}_3$	15,4	39,1	0,39
$\text{CaCl}_2$ + K Cl	14,8	40,5	0,36
$\text{CaCl}_2$ + $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	17,6	37,1	0,46

En general, el desplazamiento de Mg y la adsorción de Ca fué mayor para los tratamientos a base de  $\text{CaSO}_4$  mezclado con el suelo, que en los tratamientos a base de  $\text{CaCl}_2$  agregado al agua. Este fenómeno puede explicarse en base a que el  $\text{CaCl}_2$  posiblemente reacciona casi completamente en los primeros centímetros de superficie, quedando poco material desplazante en los centímetros siguientes. De esta manera se provoca formación de agregados únicamente en los primeros centímetros. En cambio el  $\text{CaSO}_4$  previamente incorporado al suelo posiblemente dió lugar a formación de agregados distribuidos más uniformemente a través de la columna, facilitando así el movimiento del agua. Por otra parte, esta misma explicación puede ser válida para la mayor adsorción de Ca que hubo en los tratamientos con  $\text{CaSO}_4$  incorporado, comparado con los tratamientos a base de  $\text{CaCl}_2$ . La lixiviación de Ca se mantuvo constante y fue baja, comparada con la pérdida de Mg, posiblemente debido en parte al alto contenido de montmorillonita que según algunos autores retiene el Ca mejor que otros cationes (20).

## 6.2 EL AZUFRE.

Desde el tiempo de Liebig se sabe que el azufre es un nutrimento esencial para el desarrollo de las plantas. Es utilizado por estas en cantidades apreciables y está generalmente presente en el material vegetal aproximadamente en la misma cantidad que el fósforo. Es indispensable para la formación de ciertos aminoácidos y hace parte de la estructura molecular de las proteínas. Su sintomatología de deficiencia a veces se confunde con la de nitrógeno. Hace parte también de ciertas vitaminas y enzimas, tales como la glutatona, un compuesto que se cree que está involucrado en los procesos respiratorios.

Durante los últimos años, el azufre ha merecido mucha atención de los investigadores de la fertilidad de los suelos debido a un aumento creciente de deficiencia en éstos. La deficiencia de azufre en los suelos, es debida posiblemente, entre otros, a los siguientes factores (29).

- Aumento en el uso de fertilizantes libres de azufre.

- Disminución en el uso de azufre como insecticida y fungicida.
- Reducción en la concentración de compuestos de azufre en la atmósfera y agua de lluvia, debido a la disminución del uso de combustibles ricos en azufre.
- Aparición de variedades e híbridos de alto rendimiento que requieran mayores cantidades de elementos esenciales para su nutrición.
- Al uso de ciertas prácticas de fertilización y manejo del suelo.
- Pérdidas por lixiviación y erosión.

Extensas regiones con suelos deficientes en azufre ocurren en Nueva Zelandia y en ciertas áreas de Australia ocupadas por praderas. Áreas extensas de suelos de Campos cerrados en el Brasil son completamente deficientes en azufre. Las investigaciones realizadas en este país han indicado que el algodón, los pastos, la soya y el maíz responden apreciablemente a las aplicaciones de azufre (24).

La deficiencia de este elemento ha sido observada en café en El Salvador por Fitts (9) y en el Brasil por McClung, de Freitas y Lott (27). Por otra parte en algunas zonas de los Llanos Orientales de Colombia se han detectado deficiencias de azufre en maíz y pastos (29).

Con excepción de los pastos, que absorben cantidades altas de nitrógeno y por tanto es necesario el suministro adecuado de azufre para equilibrar el metabolismo del nitrógeno dentro de la planta y en los animales que lo consumen, la mayoría de los otros cultivos comerciales basan los requerimientos de azufre principalmente en las condiciones del suelo en el cual crecen.

#### 6.2.1 Formas y Contenidos del Azufre en los Suelos.

El azufre se encuentra en las plantas, tanto en la forma orgánica como en la forma mineral. Está presente como sulfatos y ésteres de

sulfatos; en los aminoácidos, metionina, cistina y cisteína, en el aceite de ciertas plantas y en vitaminas y en muchos otros compuestos.

Relativamente poco se conoce acerca de las numerosas clases y formas de los compuestos de azufre que se encuentran en los suelos. En términos generales estas formas se clasifican como orgánicas e inorgánicas. Alrededor de 80 al 90 por ciento del azufre presente en el suelo se halla en forma de combinaciones orgánicas: proteínas, aminoácidos y otros compuestos azufrados. En casi todas las regiones húmedas, la mayoría del azufre está asociado con compuestos orgánicos. La relación N:S en la materia orgánica generalmente es de 10:1 y comúnmente se considera, que si la relación N:S en el tejido vegetal, es de 17:1 o mayor el S es deficiente en la planta (29).

El contenido de azufre en la materia seca de las plantas varía con las especies, con la parte de la planta y también con las condiciones de crecimiento. Se ha encontrado que las plantas deficientes en azufre tienen mayor concentración de fósforo y nitrógeno que las plantas normales. Además la deficiencia de azufre induce la acumulación de ciertos compuestos nitrogenados solubles que pueden ser perjudiciales a los animales. Los animales bajo régimen alimenticio deficiente en azufre, no podrán utilizar en la forma normal el nitrógeno de la dieta alimenticia, con lo cual se reducirá la producción de carne, leche y lana .

La principal forma inorgánica del S en los suelos es la de sulfatos solubles que se encuentran en la solución del suelo o en la forma iónica  $\text{SO}_4^-$ , adsorbida principalmente en el subsuelo de suelos ácidos o en la forma de precipitados de Ca, Mg y K en suelos alcalinos. El  $\text{CaSO}_4$  (Yeso) se acumula en regiones semiáridas. En casos de anaerobismo, como en los suelos anegados y pantanosos, se presentan sulfuros como la piritita ( $\text{Fe S}_2$ ). Por lo general al restablecer las condiciones aerobias, los sulfuros se transforman rápidamente a sulfatos. En suelos bien aireados solamente hasta el 1% del S inorgánico se presenta como sulfuros.

Una cantidad apreciable de S que se encuentra adsorbido en el complejo coloidal del suelo, representa la "reserva" del S para las plantas. El S de la solución del suelo y el S adsorbido guardan un equilibrio químico. Al ser absorbido por las plantas o al lixiviarse, el S de la solución del suelo es repuesto por el S adsorbido. Así mismo al disolver los fertilizantes fosfatados en la solución del suelo, pasan en parte al complejo de intercambio donde se almacenan.

El azufre total en los suelos puede variar desde casi cero, hasta más de 0,06 por ciento. Sin embargo, la mayoría de los suelos contienen entre 0,01 y 0,05 por ciento expresado en su forma elemental (8).

#### 6.2.2 Mineralización e Inmovilización

A través de los procesos de mineralización de la materia orgánica se libera el S-orgánico que luego se reduce a formas inorgánicas sulfatadas o sulfídricas. La mineralización del S-orgánico sigue el mismo esquema presentado para el nitrógeno orgánico y se conoce como el "ciclo del azufre" como se esquematiza en la figura 19.

Las proteínas, los péptidos, y otros compuestos azufrados orgánicos son convertidos a aminoácidos, tiosulfatos, tiourea, etc. En un paso más adelante el S de los aminoácidos puede ser reducido a ácido sulfuroso ( $H_2S$ ) u oxidarse a sulfato ( $SO_4^{=}$ ). Los microorganismos que actúan en estos procesos pueden ser bacterias aeróbicas, anaerobias, heterotróficas así como hongos. El  $SO_4^{=}$  puede ser absorbido por las plantas o puede ser inmovilizado por los microorganismos que lo utilizan nuevamente. El  $SO_4^{=}$  también puede ser reducido a ácido sulfuroso ( $H_2S$ ) por un mecanismo denominado desulfuración (paralelamente a la desnitrificación). Este proceso se produce de manera especial, en los suelos arcillosos y pesados o en suelos inundados, como en los cultivados con arroz.

#### 6.2.3 Oxidación del Azufre en los Suelos.

La cantidad, forma y aprovechabilidad del azufre en los suelos depende

de numerosos factores tal como se observa en la figura 19 que representa el ciclo del azufre. Las transformaciones químicas son muy importantes, pero en los suelos las transformaciones biológicas son las de mayor importancia.

a. Oxidación química del azufre en los suelos. La industria de fertilizantes está incluyendo o planea incluir azufre elemental y algunos de los compuestos de azufre reducido, tales como sulfitos, polisulfitos y tiosulfatos (sulfito de amonio  $(\text{NH}_4)_2 \text{SO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ; bisulfato de amonio  $\text{NH}_4 \text{HSO}_3$  y tiosulfato de amonio  $(\text{NH}_4)_2 \text{S}_2\text{O}_3$ ), que son generalmente más atractivos que las formas de sulfato debido a su bajo volumen por unidad de azufre, y además se pueden añadir al suelo con los fertilizantes líquidos (6).

Antes de que el azufre elemental (b) y otras formas reducidas de azufre puedan ser aprovechadas por las plantas deben ser oxidadas en el suelo a la forma de sulfato ( $\text{SO}_4$ ). Generalmente se acepta que la mayoría del azufre en el suelo es absorbido por las plantas en la forma de ión sulfato  $\text{SO}_4^-$ . Es de anotar que algunos compuestos de azufre presentes en la atmósfera pueden ser absorbidos a través de las hojas y utilizados como fuentes de este elemento. La oxidación del azufre en los suelos se logra principalmente por la acción de varios microorganismos del suelo, pero también el azufre elemental, los sulfitos y el tiosulfato puede oxidarse lentamente en el suelo por medios no biológicos. En efecto, bajo condiciones favorables puede ocurrir la oxidación química de ciertos sulfitos. Tanto el ácido sulfuroso ( $\text{H}_2\text{S}$ ), como sus sales sulfitos son agentes reductores activos y en los procesos de oxidación del azufre ellos mismos se oxidan. El dióxido de azufre puede oxidarse en aire a trióxido de azufre, pero la tasa de oxidación es extremadamente lenta a temperaturas bajas. Los tiosulfatos son oxidados fácilmente, especialmente por yodo a tetracionatos.

La oxidación no biológica de la pirita se representa químicamente en la siguiente forma :



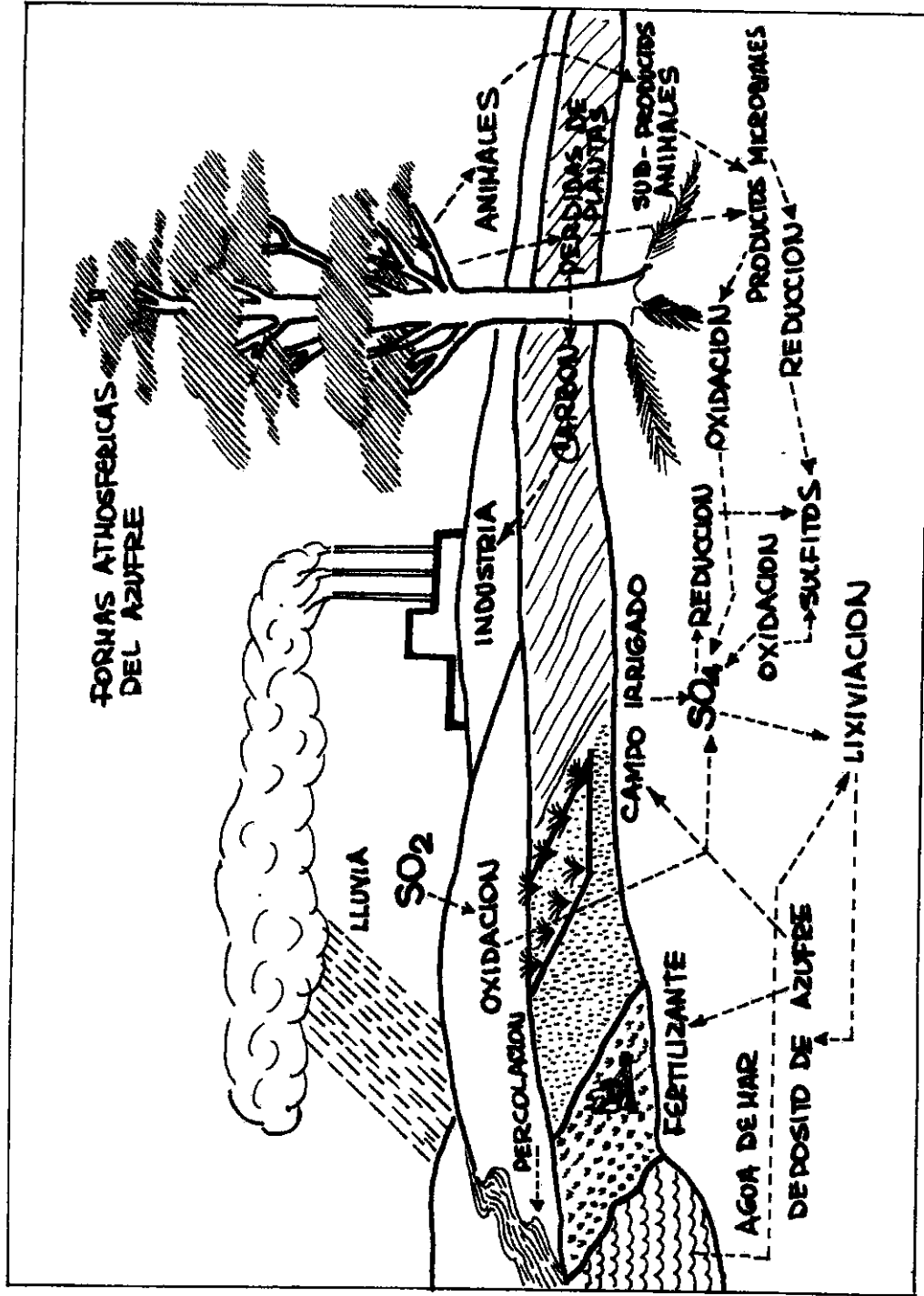


Figura 19. El Ciclo del Azufre (13).

b. La oxidación biológica del azufre en los suelos. En los suelos la oxidación biológica del azufre, ocurre continuamente, a menos que se presenten condiciones adversas tales como, heladas, anegamientos o sequía severa. Muchos organismos autotróficos y heterotróficos, están generalmente disponibles en el suelo para oxidar el azufre elemental y reducir los compuestos de azufre. Por esta razón, esencialmente todo el azufre inorgánico en los suelos bien aireados está presente en la forma de sulfato ( $\text{SO}_4^{=}$ ) que es la forma aprovechable para las plantas. Las formas reducidas, rara vez se encuentran en otras formas distintas a la orgánica, pero el azufre es continuamente liberado e inmovilizado por la fracción orgánica del suelo. De ahí el porque los suelos bien abastecidos con materia orgánica son menos deficientes en azufre.

En general los organismos que oxidan el azufre están presentes en cualquier parte donde se encuentren las formas reducidas de azufre, si las condiciones para la oxidación son favorables, y cuando se agregan al suelo formas de azufre reducido en cantidades altas, ocurre un rápido incremento de los organismos oxidantes del azufre, algunas veces con resultados impresionantes, como los que se muestran en la Tabla 31.

TABLA 31. Incremento en el número de organismos oxidantes del azufre al añadir azufre elemental en dos suelos de Kansas, EE.UU (23).

Bacterias en el suelo	Número de bacterias por gramo de suelo			
	ULYSSES CON-S	F. LIMOSO SIN-S	FORT COLLINS Con-S	FRANCO SIN-S
Thiobacillus thiooxidans	200.000	10	0	0
Thiobacillus thioparus	20.000	1.000	40.000	40
Thiobacillus denitrificans	5.000	4.000	3.000	2.500

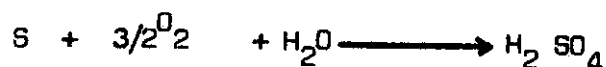
Por la amplia variedad de compuestos de azufre reducido y por la gran diversidad de organismos oxidantes del azufre en los suelos, la oxidación puede y generalmente ocurre en un límite muy amplio de condiciones. Sin

embargo, hay algunos factores que afectan la oxidación del azufre que vale la pena destacar.

#### 6.2.4 Factores que Afectan la Oxidación del Azufre.

a. La temperatura del suelo. Los límites de temperatura dentro de los cuales ocurre la oxidación biológica del azufre en los suelos es desde cerca a los 4°C hasta alrededor de 55°C. Sin embargo, en las cercanías a esos extremos la oxidación es estrechamente baja. Las temperaturas óptimas para los microorganismos oxidantes del azufre, no son iguales para todos; pero la mayoría de los organismos se adaptan muy bien entre temperaturas de 27°C y 40°C.

b. La humedad y la aireación del suelo. La ecuación general que expresa la oxidación del azufre elemental por microorganismos es la siguiente:



Esta reacción requiere oxígeno molecular y agua. En suelos con bajos niveles de humedad, se ha atribuido la tasa baja en la oxidación del azufre a la carencia de agua metabólica. En contraste, en suelos con alto nivel de humedad, la carencia de oxígeno puede ser el factor limitante. El azufre, generalmente es oxidado en los suelos más rápidamente cuando la humedad del suelo es la más apropiada para el crecimiento de de las plantas.

En áreas con lluvia escasa, la conversión del azufre elemental (S) a sulfato ( $SO_4^{=}$ ) aumenta cuando se aplica riego y cuando ocurren períodos largos de lluvia normal se encuentran suelos en donde las cosechas responden a las aplicaciones de azufre porque la tasa de oxidación del S-orgánico es muy baja en esas condiciones. En contraste, un período seco, que precede al cultivo, puede ser ventajoso, por la mineralización tan rápida de S-orgánico, que generalmente ocurre después de la sequía.

c. La reacción del suelo y el enclamiento. La oxidación del azufre,

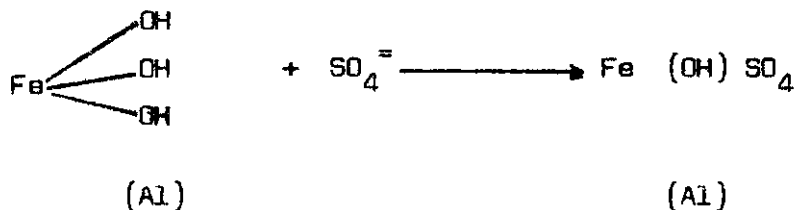
es mayor a medida que el pH del suelo va cambiando de 4,0 hacia valores más altos (25). Por esta razón, el encalamiento de los suelos ácidos puede aumentar la tasa de oxidación del azufre aplicado en los fertilizantes y la mineralización del S-orgánico.

El efecto de la reacción, del suelo sobre la mineralización del azufre se ilustra en la figura 20. Aumentando el pH del suelo por encima de 5,0 con adiciones de hidróxido de calcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , se incrementa notablemente la mineralización del azufre después de tres meses de incubación. La cal sirve generalmente para neutralizar la acidez producida por la oxidación del azufre. También la cal, tiene otros efectos que en conjunto promueven la oxidación del azufre. La cal aumenta la actividad del ión  $\text{Ca}^{++}$ , libera  $\text{CO}_2$  y disminuye la actividad de los iones  $\text{SO}_4^{=}$  e  $\text{H}^+$  por precipitación de sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ) y formación de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ). La importancia de estos cambios, ya sea simples o en combinación limitada, no es bien conocida. Sin embargo, se sabe que bajo ciertas condiciones de laboratorio enriquecen el aire con  $\text{CO}_2$  y producen una acción "buffer" en el medio de cultivo promoviendo la oxidación del azufre por organismos autotróficos.

#### 6.2.5 Factores que Afectan la Retención del Ión $\text{SO}_4^{=}$ en los Suelos.

El azufre es absorbido por las raíces de las plantas casi exclusivamente como ion sulfato ( $\text{SO}_4^{=}$ ), de ahí la importancia de conocer los factores que afectan la retención de este ión en los suelos y que se mencionan en seguida :

a. Hidrólisis de Fe y Al. Por un mecanismo de intercambio aniónico el ión  $\text{SO}_4^{=}$  puede ser intercambiado con iones  $\text{OH}^-$  de los hidróxidos de hierro y aluminio, en la forma como se indica a continuación:



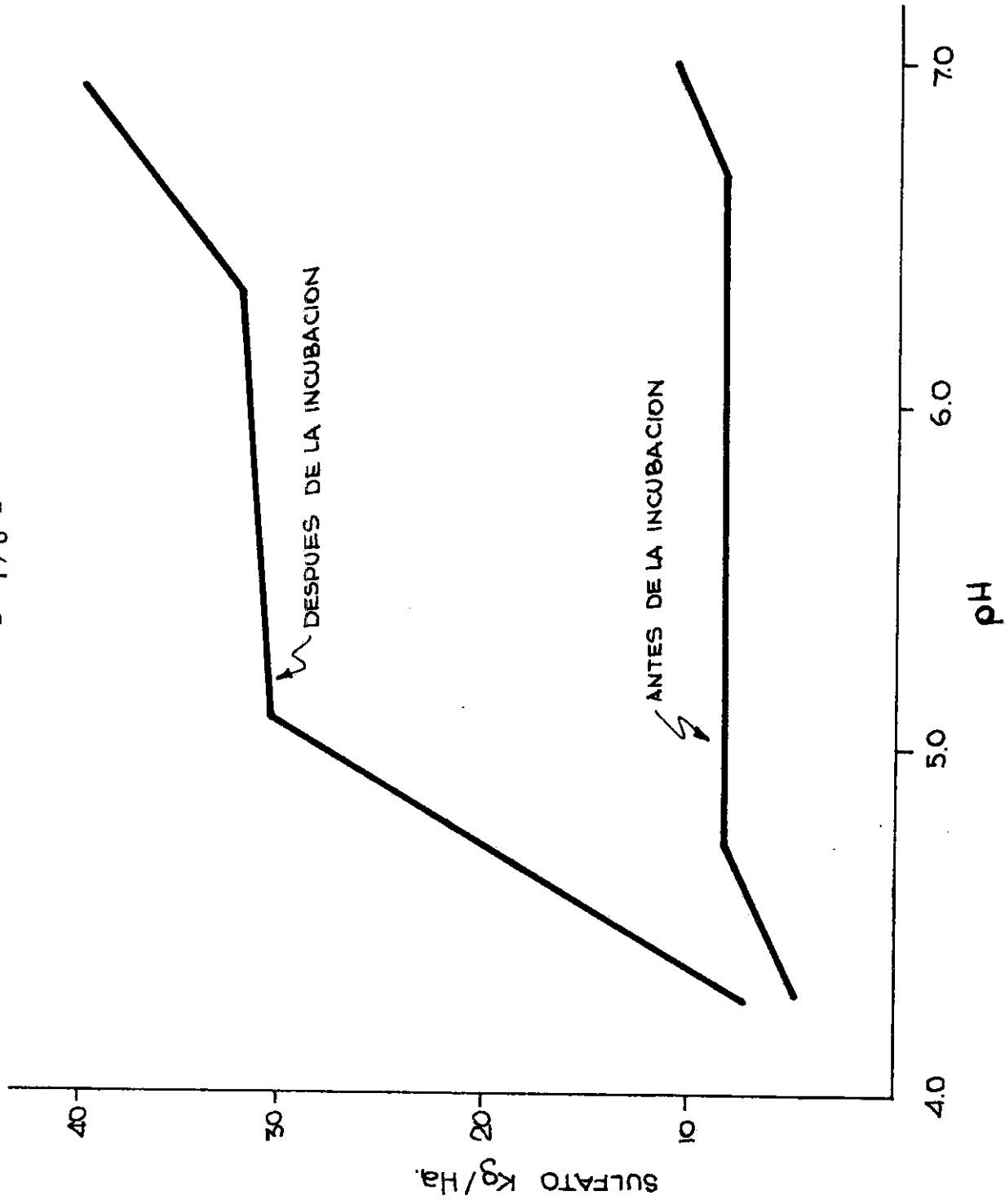


Figura 20. Efecto del pH sobre el contenido de sulfato del suelo antes y después de un período de tres meses de incubación (25).

b. Efecto del pH. Al elevar el pH del suelo se incrementan los iones  $\text{OH}^-$ , los cuales son competitivos con el ión  $\text{SO}_4^{=}$ . En esta forma el encalamiento reduce la retención del ión  $\text{SO}_4^{=}$ .

c. Efecto del ión fosfato ( $\text{PO}_4^{=}$ ). El ión  $\text{PO}_4^{=}$  es retenido en los suelos más fuertemente que el ión  $\text{SO}_4^{=}$ . Por esta razón cuando se fertiliza con fertilizantes que contengan el ión  $\text{PO}_4^{=}$  habrá disminución de adsorción de iones  $\text{SO}_4^{=}$  excepto que haya realmente cantidades altas de hidróxidos de Fe y Al en los suelos.

d. El tipo de arcilla. Los suelos que contiene relativamente altas cantidades de arcilla del tipo 1:1 adsorben más iones  $\text{SO}_4^{=}$  que los suelos que contienen arcillas predominantes del tipo 2:1. Esto es debido principalmente a que en las primeras pueden haber mayor intercambio aniónico con el  $\text{OH}^-$  de las aristas de la estructura de las arcillas. En los suelos arenosos el ión  $\text{SO}_4^{=}$  es lixiviado.

### 6.3 RESUMEN

Dentro de los elementos mayores el Ca, el Mg y el S integran un grupo denominado "elementos secundarios" pues a pesar de que las plantas lo requieren en cantidades relativamente altas, su deficiencia en los suelos es menos común. El Ca lo requieren además de las plantas, los animales para la formación de su esqueleto. El Mg es el único constituyente mineral de la molécula de la clorofila y el S es indispensable para la formación de ciertos aminocidos y de las proteínas.

El Ca y el Mg existen en muchas formas en los suelos, las formas más importantes, desde el punto de vista de la nutrición de las plantas, son la forma intercambiable y la forma soluble. El S se encuentra en forma orgánica e inorgánica. La principal forma inorgánica aprovechable para las plantas es la forma de sulfatos solubles que se encuentran en la solución del suelo, o en la forma iónica  $\text{SO}_4^{=}$ .

La aprovechabilidad del Ca y el Mg por las plantas es afectada por la reacción del suelo, su saturación en el complejo de intercambio catiónico, el tipo de coloide, la naturaleza del ión complementario y el tipo de planta. La cantidad, forma y aprovechabilidad del S en los suelos depende de numerosos factores. Las transformaciones químicas del S en los suelos son muy importantes, pero las biológicas son aún más. Las transformaciones biológicas son afectadas por factores tales como: la temperatura, la humedad, la aireación y la reacción del suelo. La retención del ión  $SO_4^{=}$  en los suelos depende de la hidrólisis del Fe y del Al, del pH, del ión fosfato ( $PO_4^{=}$ ) y del tipo de arcilla.

#### 6.4 PREGUNTAS.

1. Enuncie algunos minerales del suelo que son fuentes de Ca y Mg para las plantas. Cuales son las formas aprovechables del Ca en los suelos y describa brevemente los métodos para su determinación.
2. Comente muy brevemente el contenido de Ca y Mg intercambiable en los suelos colombianos. Es útil este conocimiento para hacer recomendaciones sobre encalamiento de los suelos ?
3. Comente brevemente el contenido de Ca en los suelos derivados de cenizas volcánicas. Es importante la determinación de Ca activo en estos suelos ?
4. Enuncie los factores que afectan la aprovechabilidad del Ca por las plantas. Como influye el tipo de arcilla en la aprovechabilidad del Ca por las plantas ?
5. Qué se entiende por "efecto de ión complementario"? Quién lo descubrió ?
5. Qué se entiende por "Serie liotrófica"? Cómo se expresa ?

7. Qué influencia tiene una relación Ca/Mg amplia sobre el manejo de los suelos ?
8. Explique brevemente porqué una relación Ca/Mg invertida en los suelos es una condición indeseable para el crecimiento de las plantas.
9. Según el trabajo de Mantilla y León (1971), describa las características generales de los suelos del Valle del Cauca, con relación Ca/Mg invertida.
10. Un suelo con una CIC de 8 meq/100 g de suelo tiene una saturación de Mg de 10%. Cuento  $\text{MgCO}_3$  por hectárea capa arable se requieren para efectuar este cambio asumiendo una reacción completa?
11. A partir del equivalente gramo, demuestre que 1 meq/100 g de suelo, es igual a 840 kg/Ha de  $\text{MgCO}_3$ . Asuma que la hectárea capa arable pesa  $2 \times 10^6$  kg.
12. El peso atómico del Ca es 40 y su valencia es 2. Asuma que una hectárea capa arable pesa 2'000.000 de kilogramos. Calcule :
  - a) A cuantos kilogramos de Ca/Ha equivale 1 meq de Ca/100 g de suelo.
  - b) A cuántos kilogramos de  $\text{CaCO}_3$  por hectárea equivale 1 meq de Ca/100 g de suelo.
13. Bajo que condiciones del suelo preferiría usted usar sulfato de magnesio y de potasio, mas bien que KCl y Dolomita y que KCl solo.
14. Enuncie algunas razones para las cuales se han incrementado las aplicaciones de azufre en los suelos.

15. En que formas se encuentra el azufre en los suelos ?
16. Trace esquemáticamente el ciclo del azufre.
17. Enuncie los factores que afectan la oxidación del azufre en los suelos.
18. Qué efecto tiene el secamiento del suelo sobre la aprovechabilidad del azufre por las plantas ?
19. Qué efecto tiene sobre la acidez del suelo el S elemental agregado al suelo ?
20. Escriba las condiciones de clima y suelo, bajo las cuales ocurren comúnmente deficiencias de azufre en los suelos ?
21. Discuta brevemente los factores que afectan la retención del ión  $SO_4^{=}$  en los suelos.
22. Bajo qué condiciones podría esperarse pérdida de azufre por lixiviación? Explique.
23. Cual es la importancia de la relación C:N:P:S en la aprovechabilidad del azufre por las plantas ?
24. Cuales son las principales funciones del azufre en las plantas ?
25. Cuales son las formas más comunes de fertilizantes de azufre que pueden agregarse a los suelos ?

## BIBLIOGRAFIA

1. ALLAWAY, W.H. 1945. Availability of replaceable Ca from different types of colloides as affected by degree of calcium saturation. Soil Sci. 59:207-217.
2. ALWAY, N.N. and J.F. THOMPSON. 1966. Sulphur in the nutrition of plants and animals. Soil Sci. 101:240-247.
3. BAIRD, B.G. y J. VANEGAS. 1961. Probable deficiencia de magnesio en los suelos de la Granja "El Placer". Agr. Tropical (Colombia) 17:278-284.
4. BEAR, F.E. and S.T. THOTH. 1948. Influence of calcium on availability of other soils cation. Soil Sci. 65:69-74.
5. BLACK, C.A. 1957. Soil-plant relationship. New York, John Wiley Inc. 332 p.
6. BURNS, G.R. 1967. Oxidation of sulphur in soils. Washington, D.C. The sulphur Institute. Tech. Bull. 13. 41. p.
7. CHAO, T.T. 1963. Cationic effects on sulfate adsorption by soils. Soil Sci. Amer. Proc. 27:35-38.
8. FASSBENDER, H.W. 1975. Química de los suelos con énfasis en los suelos de América Latina. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA- Turrialba, Costa Rica. Editorial IICA. Serie Libros y materiales educativos No.24. 380 p.
9. FITTS, J.N. 1970. Sulphur deficiency in Latin America. Sulphur Inst. Jour. 6(2) 14-17.

10. GABDAN, J.; M. BLASCO y R. GUERRERO. 1972. El calcio en los suelos volcánicos del Altiplano de Pasto. Universidad de Nariño. Revista de Ciencias Agrícolas 4(1):5-12.
11. GOMEZ, J.; D.F. ZORRILLA; C.A. FLOR Y V. PORRAS. 1969. Influjo de la relación Ca/Mg en la producción de maíz en el Valle del Río Cauca, Colombia. Agric. Trop. (Colombia). 24:116-118.
12. HAJDUCK, J. and I. HAUSKRECHT. 1967. Investigations of magnesian soils and their reclamation in the neighbourhood of magnesite factories. Soil and Fertilizers. Vol. 30 (4).
13. JORDAN, H.V. and L.E. ENSMINGER. 1958. The role of sulphur in soil fertility. Adv. Agr. 10:407-434.
14. KAMPRATH, E.J.; W.L. NELSON, and J.V. FITTS. 1956. The effect of pH, sulphate and phosphate concentrations on the adsorption of sulphate by soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 20: 463-466.
15. LEON, L.A. y C. SANCHEZ. 1963. Estudios de los suelos de la Granja "El Placer". Popayán. Agric. Trop. (Colombia) 19:344-355.
16. LEON, L.A. 1968. Relación Calcio, Magnesio y Potasio, en suelos de "La Florida". Popayán. Agr. Trop. (Colombia) 24:335-345.
17. LOPEZ, M. 1965. Cambios químicos provocados en un suelo de la Serie Chinchiná, Franco-arenoso con la aplicación de distintas fuentes y dosis de fertilizantes. Cenicafé (Colombia) 16:55-76.
18. 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.

19. MANTILLA, G. y A. LEON. 1971. Estudios de suelos del Valle del Cauca con relación Ca/Mg invertida. I. Características de los suelos. Revista ICA. 6:41-56.
20. MANTILLA, G. y A. LEON. 1971. Estudios de 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.
21. MARIN, G. 1971. La capacidad de intercambio catiónico y las bases intercambiables del suelo pp- 75-93 En: Interpretación del análisis de suelos y recomendaciones de fertilizantes. Bogotá Instituto Colombiano Agropecuario, Programa de Educación Continuada. 199 p.
22. MARTIN, W.E. and T.W. WALKER. 1966. Sulphur requirements and fertilization of pasture and forage crops. Soil Sci. 101:248-257.
23. MOSER, U.S. and R.V. OLSON. 1953. Sulphur oxidation in four soils as influenced by soil tension and sulphur bacteria. Soil Sci. 76:251-257.
24. McCLUNG, A.C.; L.M. DeFREITAS and W.L. LOTT. 1959. Analysis of several Brazilian soils in relation to plant responses to sulphur. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 23:221-224.
25. NELSON, L.E. 1964. The effect of pH on the acetate-soluble sulphur content of a Myhew soil in Mississippi before and after incubation. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 28:290-291.
26. OMAR, M.A. y T. KOBBIYA. 1966. Some observations on the interrelationship of potassium and magnesium. Soil Sci. 101:437-440.

27. PARRA, A. y J. GAMBOA. 1972. Fraccionamiento del calcio en suelos volcánicos del Altiplano de Ipiales. Pasto. Revista de Ciencias Agrícolas 4(1):13-21.
28. PEARL, R.M. 1959. Rocks and Minerals. New York. Barnes & Noble, Inc. Publishers 275 p.
29. PEDRAZA, L. y R. LORA. 1974. Disponibilidad del azufre para las plantas en dos suelos de los Llanos Orientales de Colombia. Revista ICA. 9(1):77-112.
30. PETERSON, F.F.; J. RHODES, M. RICO Y N.T. COLEMAN. 1965. Selective adsorption of magnesium by vermiculita. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 9:327-328.
31. RAMIREZ, A. y J. LOTERO. 1969. Efecto de dosis y frecuencia de aplicación de nitrógeno en la fertilidad y propiedades químicas del suelo. Rev. ICA 4(4):227-254.
32. RODRIGUEZ, A. 1958. Fertilidad de los suelos cafeteros de Colombia Bogotá, Revista Cafetera de Colombia (24(134):21-30.
33. RODRIGUEZ, M. y A.C. McCLUNG. 1964. Respuesta del molibdeno en dos suelos rojos de Antioquia. Agric. Trop. (Colombia) 20:504-512.
34. ROLONG, N y A. RAMIREZ. 1975. Influencia de la relación Ca/Mg sobre el desarrollo del sorgo (Sorghum vulgare L.) y la producción de frijol (Phaseolus vulgaris L.) en ocho suelos del Valle del Cauca, Colombia, Medellín. IV Coloquio Nacional sobre suelos. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (Ed.) Resúmenes 20
35. RUSSEL, E.J. 1953. Soil condition and Plant Growth. London, Longmans, Green and Co. 635 p.

36. SANDOVAL, A. y G. RODRIGUEZ. 1971. Estudio de la relación calcio, magnesio, potasio en las principales series de suelos de la Sabana de Bogotá. Bogotá, Universidad Jorge Tadeo Lozano. Tesis Agrólogo. 71 p.
37. TISDALE, S.L. y W.L. NELSON. 1966. Soil fertility and fertilizers. 2da. Ed. New York. The MacMillan Co. 620 p.
38. ZIMMERMAN, N. 1974. Magnesium in plants. Soil Sci. 63:1-12.