

METABOLISMO DEL AZUFRE EN SUELOS AGRICOLAS DE NICARAGUA

Tesis de Grado

MAGISTER SCIENTIAE

Hernán Ignacio Burbano Orjuela



INSTITUTO INTERAMERICANO DE CIENCIAS AGRICOLAS DE LA OEA
Centro Tropical de Enseñanza e Investigación
Departamento de Cultivos y Suelos Tropicales
Turrialba, Costa Rica
Abril, 1973

METABOLISMO DEL AZUFRE EN SUELOS AGRICOLAS DE NICARAGUA

Tesis

Presentada al Consejo de la Escuela para Graduados
como requisito parcial para optar al grado

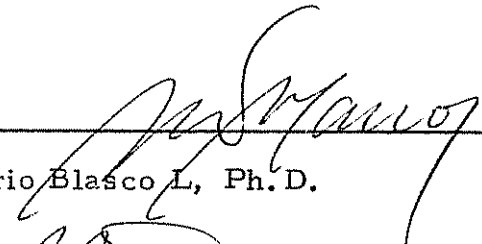
de

Magister Scientiae

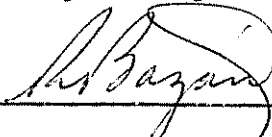
en el

Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA

APROBADA:



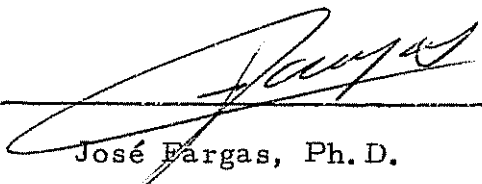
Mario Blasco L, Ph.D. Consejero



Rufo Bazán, Ph.D. Comité



Oscar Hidalgo-Salvatierra, Ph.D. Comité



José Fargas, Ph.D. Comité

Abril, 1973

A mis Padres

A Elssy Sofía

A mis hermanos

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece sinceramente al Dr. Mario Blasco L., Consejero Principal, por la orientación brindada a través de todo el período de estudios en la Escuela y en especial por la acertada dirección en el presente trabajo.

A los Drs. Rufo Bazán, Oscar Hidalgo-Salvatierra y José Fargas, miembros del Comité Consejero, por la colaboración prestada en la revisión del original y por las sugerencias para mejorar el trabajo.

Al Dr. Gilberto Páez y al Ingeniero Víctor Quiroga M. S., por la asesoría en el campo de la Estadística.

Agradece de manera especial a la Organización de Estados Americanos OEA por haberle concedido la beca y al Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas por la oportunidad de ingresar en la Escuela para Graduados del IICA-CTEI. Igualmente a la Universidad de Nariño por la comisión de estudios otorgada.

A la Zona Norte del IICA por la ayuda económica para adelantar este trabajo y a la Oficina de Catastro y Recursos Naturales de Nicaragua por su desinteresada colaboración.

A quienes en forma diversa brindaron su concurso para que este trabajo llegara a feliz término.

BIOGRAFIA

El autor nació en Pasto, Colombia, el 2 de julio de 1945.

Realizó sus estudios de bachillerato en el Instituto Champagnat y los profesionales en la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad de Nariño, graduándose de Ingeniero Agrónomo en el año de 1968.

Desde 1969 presta sus servicios profesionales en la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad de Nariño. Habiendo ingresado a la carrera profesoral en el año de 1970 en calidad de profesor asistente, adscrito al Departamento de Fitotecnia en el área de Suelos. En el año de 1971 fue nombrado Jefe del Departamento de Fitotecnia.

Participó en el Curso de Metodología de la Enseñanza que ofreció la Zona Andina del IICA en julio de 1971.

En octubre de 1971 ingresó a la Escuela para Graduados del Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA en Turrialba, Costa Rica, para realizar estudios de postgrado en la especialidad de suelos, habiendo obtenido el grado de Magister Scientiae en abril de 1973.

CONTENIDO

	<u>Página</u>
1. INTRODUCCION.....	1
2. REVISION DE LITERATURA.....	3
2.1. Importancia del azufre.....	3
2.2. El azufre del suelo.....	4
2.3. Transformaciones del azufre en el suelo.....	8
2.4. Ciclo del azufre.....	12
2.5. Mineralización del azufre en el suelo.....	13
2.6. Actividad metabólica del suelo.....	15
3. MATERIALES Y METODOS.....	17
3.1. Area de estudio.....	17
3.1.1. Localización y descripción general.....	17
3.1.2. Suelos estudiados.....	18
3.2. Muestreo y preparación del suelo.....	20
3.3. Procedimiento experimental.....	20
3.4. Métodos analíticos.....	22
3.5. Análisis estadístico.....	23
4. RESULTADOS.....	25
4.1. Características generales de los suelos.....	25
4.2. Concentración de las fracciones de azufre en los suelos.....	26
4.3. Relación de las fracciones de azufre.....	30
4.4. Variación de las fracciones de azufre y otras carac- terísticas físico-químicas en función de la distancia a los volcanes El Chonco-San Cristóbal y profundidad en el perfil.....	31
4.5. Prueba de incubación.....	40
4.5.1. Efecto de la adición de distintos elementos en la mineralización e inmovilización del azufre.....	40
4.5.2. Efecto de la adición de distintos elementos en la producción de sulfato.....	41
4.5.3. Metabolismo de los suelos expresado como producción de CO ₂	53

	<u>Página</u>
5. DISCUSION.....	54
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	64
7. RESUMEN.....	66
7a. SUMMARY.....	68
8. LITERATURA CITADA.....	69
APENDICE.....	76

LISTA DE CUADROS

<u>Cuadro No.</u>		<u>Página</u>
1	Características generales de los suelos estudiados	77
2	Concentración de las diferentes formas de azufre y sus porcentajes referido a la fracción total.....	78
3	Matriz de correlación de las diferentes fracciones de azufre y otras características fisico-químicas de los suelos estudiados.....	79
4	Matriz de correlación generada en el análisis de superficie de respuesta para los distintos suelos estudiados.....	80
5	Cambios en la concentración de S-disponible durante la incubación del suelo La Lapa por un lapso de 6 semanas a la temperatura de 28-30°C y 0.33 bares de tensión.....	81
6	Cambios en la concentración de S-disponible durante la incubación del suelo La Mora por un lapso de 6 semanas a la temperatura de 28-30°C y 0,33 bares de tensión.....	82
7	Tasas de producción de sulfatos y análisis de variancia para el suelo La Lapa.....	83
8	Tasas de producción de sulfatos y análisis de variancia para el suelo La Mora.....	84
9	Ecuaciones de regresión obtenidas para la producción de sulfato en el suelo La Lapa.....	85
10	Ecuaciones de regresión obtenidas para la producción de sulfatos en el suelo La Mora.....	87
11	Producción de CO ₂ en mg/10 g en el suelo La Lapa incubado por un período de 6 semanas a 28-30°C y 0,33 bares de tensión.....	89
12	Producción de CO ₂ en mg/10g en el suelo La Mora incubado por un período de 6 semanas a 28-30°C y 0,33 bares de tensión.....	90
13	Tasas de producción de CO ₂ y análisis de variancia para el suelo La Mora.....	91

LISTA DE FIGURAS

<u>Figura No.</u>		<u>Página</u>
1	Cantidades de S-SO ₄ intercambiable, con (PO ₄) ₂ H ₂ Ca ₂ H ₂ O en extracciones sucesivas.....	29
2	Variabilidad en la concentración de S-orgánico como resultado de la distancia a los volcanes El Chonco y San Cristóbal, y profundidad del perfil.....	33
3	Variabilidad en la concentración de S-reserva del suelo como resultado de la distancia a los volcanes El Chonco y San Cristóbal y profundidad del perfil..	34
4	Variabilidad en la concentración de S-intercambiable PO ₄ H ₂ K como resultado de la distancia a los volcanes El Chonco y San Cristóbal, y profundidad del perfil.....	35
5	Variabilidad en el pH como resultado de la distancia a los volcanes El Chonco y San Cristóbal y profundidad del perfil.....	36
6	Variabilidad en el porcentaje de arcilla como resultado de la distancia a los volcanes El Chonco y San Cristóbal y profundidad del perfil.....	37
7	Variabilidad en el porcentaje de arena como resultado de la distancia a los volcanes El Chonco y San Cristóbal, y profundidad del perfil.....	38
8	Variabilidad en la capacidad de intercambio catiónico como resultado de la distancia a los volcanes El Chonco y San Cristóbal, y profundidad del perfil...	39
9	Cambio en la concentración de S-SO ₄ en el suelo La Lapa por efecto de la adición de glucosa, nitrógeno y fósforo (0:valor original, + : mineralización, -: inmovilización).....	42
10	Cambio en la concentración de S-SO ₄ en el suelo La Lapa por efecto de la adición de calcio, magnesio y azufre (0: valor original, + : mineralización, - : inmovilización).....	43

<u>Figura No.</u>		<u>Página</u>
11	Cambio en la concentración de S-SO ₄ en el Suelo La Mora por efecto de la adición de glucosa y nitrógeno (0: valor original, + :mineralización, - : inmovilización).....	44
12	Cambio en la concentración de S-SO ₄ en el suelo La Mora por efecto de la adición de fósforo y calcio (0: valor original, + :mineralización, -: inmovilización).....	45
13	Cambio en la concentración de S-SO ₄ en el suelo La Mora por efecto de la adición de magnesio y azufre (0: valor original, + :mineralización, - : inmovilización).....	46
14	Efecto de la adición de glucosa y fósforo en la producción de CO ₂ en el suelo La Lapa para diferentes períodos de incubación.....	47
15	Efecto de la adición de nitrógeno y calcio en al producción de CO ₂ en el suelo La Lapa para diferentes períodos de incubación.....	48
16	Efecto de la adición de magnesio y azufre en la producción de CO ₂ en el suelo La Lapa para diferentes períodos de incubación.....	49
17	Efecto de la adición de glucosa y nitrógeno en la producción de CO ₂ en el suelo La Mora para diferentes períodos de incubación.....	50
18	Efecto de la adición de fósforo y calcio en la producción de CO ₂ en el suelo La Mora para diferentes períodos de incubación.....	51
19	Efecto de la adición de magnesio y azufre en la producción de CO ₂ en el suelo La Mora para diferentes períodos de incubación.....	52
 <u>Apéndice</u>		
20	Localización de los sitios de muestreo en la Región Pacífica de Nicaragua.....	93

1. INTRODUCCION

El azufre es un elemento que, a pesar de ser requerido por las plantas en cantidades similares al fósforo, ha recibido una atención menor de la que su importancia requería. Posiblemente a esta situación han contribuido las dificultades que se han presentado en su determinación química bien que se sigan marchas analíticas oxidativas o procedimientos de tipo reductivo. En la actualidad los estudios del azufre vienen cobrando una mayor importancia debido a que su deficiencia, en las formas asequibles a la planta, parece bastante generalizada en distintas áreas de Latinoamérica.

El azufre se presenta en los suelos en distintas formas de acuerdo con los diferentes estados de oxidación-reducción del elemento y su combinación con las fracciones orgánica e inorgánica. Si bien la concentración total de azufre en los suelos puede ser elevada, la cantidad disponible para las plantas es, generalmente, deficitaria. A ello contribuye que el azufre es en parte retenido por los sesquióxidos, alófana y caolinita, a la vez que las formas libres en la solución del suelo pueden ser lixiviadas a horizontes más profundos del perfil. A lo anterior se suma que la fertilización fosfatada puede desplazar por acción del ión PO_4^{3-} los sulfatos de la capa arable.

Los compuestos azufrados orgánicos constituyen, en muchos casos, la reserva potencial de una disponibilidad adecuada para las plantas. No obstante, diversos mecanismos de las reacciones bioquímicas que se

producen en el suelo, todavía no bien comprendidos, hacen que la velocidad de mineralización y la cantidad de sulfatos generada, sean insatisfactorios. De ahí que diversas investigaciones estén empeñadas en buscar la manera de activar las reacciones de mineralización tratando de conseguir un flujo adecuado del azufre orgánico a la fase intercambiable y a la solución del suelo que permita a las plantas una nutrición adecuada.

Teniendo en cuenta lo enunciado se realizó el presente trabajo con cinco series de suelos agrícolas de Nicaragua, derivados de cenizas volcánicas recientes y localizados en la Región Pacífica de este país. Los objetivos a alcanzar en este estudio fueron:

- 1) Determinar las diferentes formas de azufre en los suelos seleccionados.
- 2) Medir la disponibilidad del azufre por efecto de las adiciones de N, P, Ca, Mg, S y glucosa.

2. REVISION DE LITERATURA

2.1. Importancia del azufre

El azufre es esencial en la producción de cosechas y es requerido por las plantas en, aproximadamente, las mismas cantidades que el fósforo, razón por la cual debe situarse en la categoría de los elementos mayores (80, 21, 13, 6). Las plantas toman la mayor parte del azufre del suelo como ión sulfato, más aprovechable que las otras formas, el cual puede provenir de la oxidación del azufre elemental o del anhídrido sulfuroso, aunque también pueden asimilar aminoácidos. Otra posibilidad es que puede penetrar en las hojas bajo la forma de SO_2 ; no obstante debe tenerse en cuenta que este gas se torna muy tóxico para las plantas a muy bajas concentraciones. Si bien el azufre penetra en el vegetal en forma oxidada, es reducido, frecuentemente, a radical sulfhidrilo (-SH) (84, 62, 48, 42, 31, 13).

La importancia metabólica del azufre se debe a los aminoácidos L-cistina, L-cisteina y L-metionina, que se encuentran dentro de las proteínas y otros compuestos azufrados de peso molecular relativamente bajo. No debe pensarse sin embargo, que por el énfasis cuantitativo, otros compuestos de azufre, tales como las vitaminas biotina y tiamina, la coenzima A y los sulfoésteres no son de importancia crítica en nutrición, aunque las cantidades de azufre en ellos son pequeñas en relación a las cantidades presentes en forma de aminoácidos. Otra función del azufre se encuentra en los grupos sulfhidrilo, necesarios para la actividad enzimática. También

este elemento establece puentes que, en la molécula proteica, ayudan a los enlaces peptídicos y a los puentes de hidrógeno a estabilizar la estructura de la proteína. Por eso la deficiencia de azufre se refleja en la transformación de N-proteínico en nitratos y otras formas de nitrógeno soluble dentro de las plantas (11). Es indispensable para la formación de la clorofila y mantiene elementos esenciales, como hierro y manganeso, en solución. La glutatona que tiene cistina es de importancia en las reacciones de oxidación-reducción fisiológicas. También el azufre es constituyente de varios compuestos orgánicos que dan olor y sabor a los vegetales (63, 31, 4, 3).

2.2. El azufre del suelo

La mayor parte de rocas ígneas contienen entre 0,05 y 0,3 % de azufre, principalmente como sulfuros de hierro, níquel y cobre. Las rocas ígneas básicas generalmente tienen un contenido más alto que las de tipo ácido. Durante los procesos de meteorización los sulfuros pasan a sulfatos, de ahí que muchas rocas sedimentarias tienen contenidos apreciables de sulfatos (84).

El contenido de azufre en los suelos inorgánicos varía entre 0,02 y 0,2 % (36), encontrándose este nutrimento en la mayor parte de los terrenos arables acompañado con la materia orgánica, como sulfatos solubles en la solución del suelo, o adsorbido en el complejo coloidal (80). Distintos análisis indican que el suministro de azufre a las plantas a través de la precipitación pluvial y directamente de la atmósfera puede ser de gran

(11) BLASCO, M. Comunicación personal

importancia, especialmente alrededor de centros de gran actividad industrial (80, 50).

La concentración de aniones en la solución del suelo es afectada por la naturaleza de la fase sólida (43). Varios trabajos (43, 27, 26, 25, 23) indican que la adsorción del sulfato depende de la naturaleza del coloide del suelo (sesquióxidos de Fe y Al, tipo de arcilla, materia orgánica), del pH y de la clase de cationes de cambio presentes. Se ha encontrado alto grado de asociación entre el contenido de arcilla (componente de adsorción) y el sulfato adsorbido, evidenciándose que el orden de adsorción es: suelo latosol > suelo volcánico > suelo aluvial (57). En aquellos suelos que no retienen el sulfato en forma e intensidad adecuadas, se produce el traslado de los sulfatos a través del perfil y en casos extremos su lavado, llegando a horizontes profundos del suelo (36).

Jordan y Ensminger (51) indican que hay pérdidas continuas las cuales tienden a balancear las adiciones de azufre al sistema suelo-planta. La remoción por parte de la planta, lixiviación más allá de la zona radicular, y erosión son las principales formas por las cuales el azufre se pierde de los suelos.

El azufre total del suelo indica la reserva de este elemento que puede ser convertida por acción química o bacterial, a la forma más rápidamente aprovechable por las plantas, y su rango en la mayoría de los suelos está entre 0,01 y 0,05 % (12). Massoumi y Cornfield (61) en base al análisis de numerosas muestras encontraron que el azufre total oscilaba entre 0,012 y 0,17 %. Según Whitehead (84) el azufre total de los suelos es muy

variable, el rango es de 0,002 a 0,35 %. Teniendo en cuenta un estudio sobre 17 suelos, Williams (85) señala cantidades que van desde 0,012 a 0,11 % de azufre total. Trabajos realizados en Francia por Simon-Sylvestre (75) indican que el azufre total constituye entre el 0,147 y 0,094% del azufre del suelo. Domínguez y Rodríguez (32) encontraron para suelos volcánicos de Colombia, que el azufre total en promedio no sobrepasa el 0,07% y que los subsuelos son más pobres que los suelos. En suelos derivados de cenizas volcánicas (Chile), Schalscha et al. (77) dan valores para el azufre total que están comprendidos entre 0,03 y 0,11% y consideran que los horizontes superficiales son en general, ricos en S-total, debido probablemente al enriquecimiento por la acumulación de materia orgánica (reciclaje por las plantas). En suelos del Canadá se han encontrado cantidades de azufre total que representaban 0,13% (55). Granados (46) en suelos de Turrialba, Costa Rica, reporta que el azufre total fluctúa entre 0,24 y 0,34%. Blasco (18) para suelos de Centroamérica da valores de azufre total que oscilan entre 0,047 y 0,23 %.

Una gran variedad de compuestos orgánicos de azufre están presentes en la materia orgánica del suelo como proteínas y otros compuestos orgánicos producidos por plantas, animales y microorganismos (53, 41). El sulfato es rápidamente lixiviado del suelo, mientras que el azufre en compuestos orgánicos resiste la lixiviación y es descompuesto gradualmente a sulfato (78). Williams y Donald citados por Freney y Stevenson (41), conceptúan que las plantas juegan un papel definitivo en la conversión del sulfato inorgánico a compuestos orgánicos de azufre en el suelo; ellos

encontraron que todo el sulfato inorgánico aplicado como superfosfato a un número de suelos en un período de 15 a 25 años, pudo ser recobrado en la materia orgánica del suelo. Bardsley y Lancaster (10) indican que la mayor parte del azufre del suelo superficial de las regiones húmedas ocurre en combinaciones orgánicas.

Lowe (56) encontró en suelos del Canadá (Alberta), que las formas orgánicas de azufre predominan en toda la superficie y horizonte B. De acuerdo con Freney (40) el azufre orgánico equivale al 90-98% del azufre total, en suelos de Australia. Lowe y Delong (55) indican que para suelos de la provincia canadiense de Quebec la fracción orgánica del azufre varía entre 33 y 70%. McClung et al. (58) dan cifras de 10 a 247 ppm, para suelos de Brasil. En suelos volcánicos de Colombia, según Domínguez y Rodríguez (32) el valor promedio del azufre orgánico es equivalente a 22,7%. Los valores de azufre orgánico según Granados (46) quien trabajó con suelos de Costa Rica, corresponden a 38-60%. Blasco (18) encontró que en conjunto los suelos de Centroamérica estudiados tienen 35% de azufre orgánico.

Los sulfatos solubles han mostrado ser variables y llegar a niveles altos en los horizontes más profundos de algunos suelos de pH relativamente alto (56). Schalscha et al. (74), consideran que el azufre aprovechable probablemente está relacionado con el S-adsorbido, y de acuerdo a varios de los suelos de Chile estudiados su nivel es bajo, ya que sus valores generalmente no superan los 3,11 gS/g de suelo. Para suelos del área Centroamericana se juzga que casi todos muestran concentraciones deficitarias de azufre disponible (18).

2.3. Transformaciones del azufre en el suelo

El comportamiento del azufre en el suelo puede considerarse con referencia a tres tipos de compuestos: formas reducidas de azufre contenidas en combinaciones orgánicas, azufre en forma de sulfato, y azufre elemental y sulfuros (80).

El azufre en sus formas orgánicas e inorgánicas es metabolizado en el suelo. La dominancia de una u otra transformación es gobernada en buena parte por las circunstancias ambientales que afectan la composición y actividad de la microflora. Cuatro procesos pueden realizarse: a) descomposición de los compuestos orgánicos de azufre; b) asimilación microbial o inmovilización de compuestos simples de azufre; c) oxidación de compuestos inorgánicos; y d) reducción del sulfato y otros aniones a sulfuro (79, 3).

La gran mayoría de microorganismos pueden llenar sus requerimientos de azufre a partir de los sulfatos. El azufre tiene una valencia de -2 en los compuestos orgánicos de la célula, mientras que tiene una valencia de + 6 en el sulfato. Es por esto, que la asimilación del sulfato conlleva una reducción de sulfato a sulfuro, antes de su incorporación en los compuestos orgánicos. Químicamente, esto es equivalente a la reducción del sulfato por la bacteria sulforeductora (77). Bajo ciertas condiciones los microorganismos compiten con las plantas por el azufre aprovechable presente. Esto sucede cuando se incorporan al suelo residuos con alto contenido de carbono que incide en la rápida proliferación de la microflora. En general, relaciones C:S que excedan 50:1 resultarán en una inmovilización microbial (79).

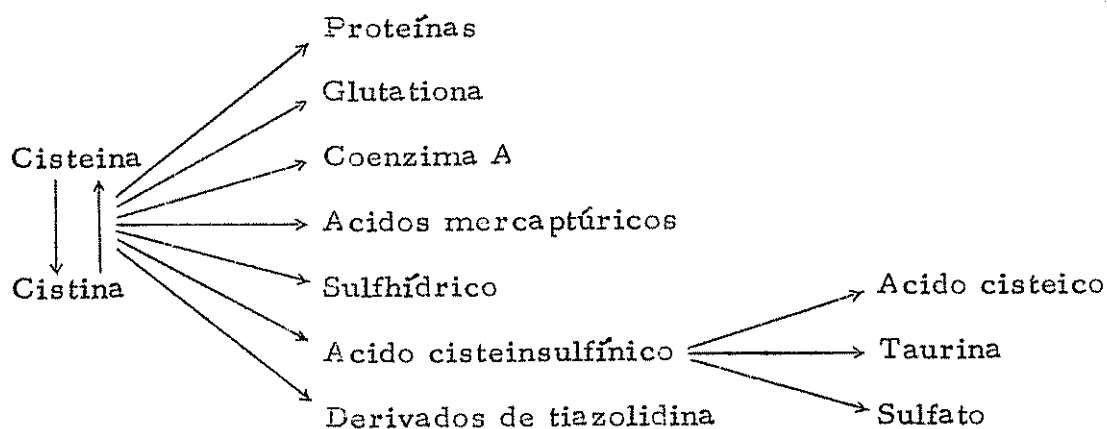
En el proceso de mineralización de los compuestos orgánicos azufrados intervienen diversos microorganismos no especializados del suelo. En contraposición, para la oxidación-reducción de los compuestos inorgánicos se requiere una microflora especializada (16). El género Beggiatoa comprende los más conocidos representantes de los microorganismos que Winogradsky agrupó como sulfobacterias (86). En la oxidación del azufre inorgánico el género más importante es el Thiobacillus, constituido por organismos quimoautotróficos, dentro del cual se destacan las especies T. thiooxidans que tolera un pH hasta de 0,6; T. novellus, T. thioparus, T. ferrooxidans y T. denitrificans (82, 81, 19, 16, 3). Un segundo grupo de microorganismos que oxidan los compuestos reducidos de azufre son fotosintéticos que pertenecen a las familias Thiorhodaceae y Chlorobacteriaceae, caracterizados por los géneros Chromatium y Chlorobium. Ciertos hongos y actinomicetos también pueden participar en la oxidación del azufre (87, 79, 68, 5).

Las bacterias sulforeductoras forman un grupo especializado de microorganismos que utilizan el sulfato como aceptor terminal de electrones para su respiración (70). Estos microorganismos son bacterias del género Desulfovibrio, y aunque se han descrito varias especies, D. desulfuricans parece ser la más abundante en la naturaleza. También actúa en la reducción el género Desulfotomaculum. Bacterias como Bacillus megaterium, Pseudomonas zelinskii, Vibrio desulfuricans y Vibrio aestuarii, participan igualmente en la reducción del sulfato (16, 3).

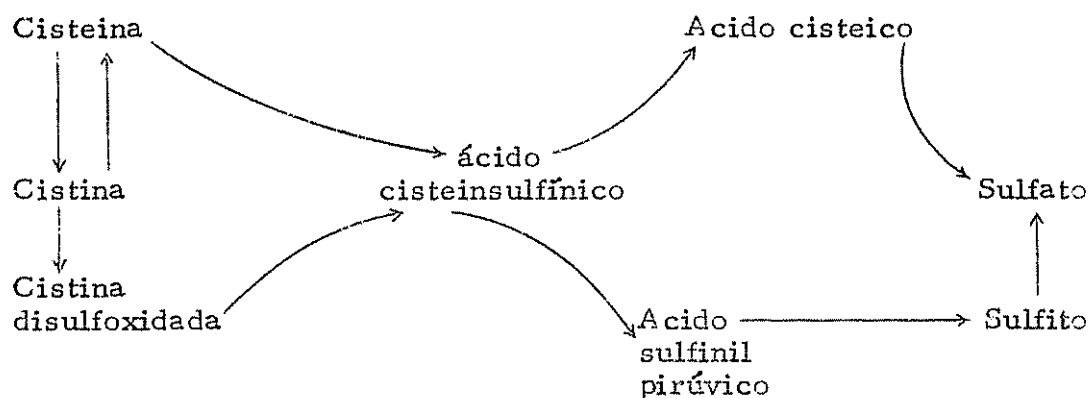
Poco se conoce sobre los pasos relacionados con la descomposición de los compuestos orgánicos de azufre para formar sulfatos. La mayor proporción de sulfato mineralizado proviene de los aminoácidos cisteína, cistina y metionina (79, 16).

El estudio de los estados iniciales de la oxidación enzimática de la cisteína, es complicado por la susceptibilidad a la oxidación catalítica con trazas de iones metálicos (Fe^{3+} , Cu^{2+} , Mn^{2+}). Es probable que la oxidación de cisteína a cistina sea efectuada en grado considerable por citocroma c-citocroma oxidasa (54).

Young y Maw (87) indican que la cisteína y cistina sufren un número de reacciones metabólicas y las detallan de esta manera:



Freney (42) propone el siguiente esquema para explicar la transformación de la cisteína hasta formar sulfato:

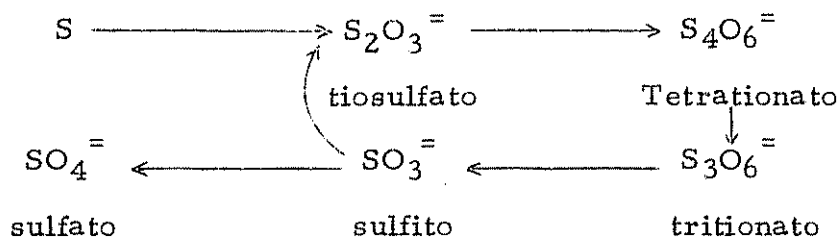


Kum (54) da cuenta de que la relación metabólica de metionina y cisteína fue clarificada por el grupo de du Vigneaud. Señalando que la conversión de metionina a cisteína, es referida a menudo a un proceso de transulfuración que sigue entre un compuesto intermedio, la cistationina, formado por una pérdida de agua de la cisteína y serina.

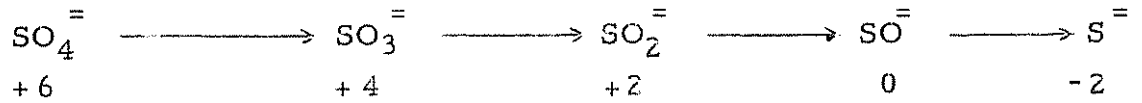
Bajo condiciones anaeróbicas la descomposición (mineralización) resultará en acumulación de mercaptano y sulfuro de hidrógeno (79).

Frenay (42) dice que al descomponerse la cisteína en condiciones de anaerobismo, evoluciona a productos tales como sulfhídrico, ácido pirúvico y amoníaco. Para que se efectue esta reacción debe actuar como catalizador la enzima cisteína desulfhidrasa (16).

En la oxidación del azufre inorgánico Vishniac y Santer citados por Alexander (3) proponen el siguiente orden:



Peck (68) postula los siguientes intermediarios inorgánicos en la reducción del sulfato:



2.4. Ciclo del azufre

El azufre es requerido para el metabolismo de todos los organismos, y es usado por ellos en un proceso cíclico (42). Las plantas y microorganismos son, en gran parte, los responsables de la interconversión de los compuestos de azufre en la naturaleza, ya que la contribución de los animales a este proceso es cuantitativamente pequeña (87). Ivanov (49) considera que el ciclo del azufre en la naturaleza constituye una cadena compleja de reacciones de oxidación-reducción, en cada una de las cuales toman parte diversas especies de microorganismos. Según Stevenson (79) el ciclo del azufre en el suelo lo constituyen cuatro fases: mineralización, inmovilización, oxidación y reducción.

Alexander (3) esboza el ciclo del azufre de esta manera: La vegetación toma la mayor parte del azufre de los sulfatos. Los animales, por el contrario, satisfacen su necesidad de este elemento por el consumo de plantas u otros animales. Cuando los residuos orgánicos se incorporan al suelo, las proteínas de los tejidos de plantas y animales son hidrolizadas por la microflora al estado de aminoácidos, los cuales por una serie de reacciones descritas en el epígrafe 2.3 se transforman a sulfatos en medios aeróbicos, mientras que bajo condiciones de anegamiento u otras circunstancias anaeróbicas se acumula H_2S . La formación de sulfuros resulta

en parte de la reducción de sulfatos y en parte de la mineralización del azufre orgánico. Para ambos, sulfuros y sulfatos las secuencias de oxidación y reducción intermedias son distintas, por eso no persisten por períodos largos, y su concentración en la naturaleza comunmente es baja. La interconversión del azufre, sulfatos y sulfitos, puede ser realizada por los microorganismos. Además, pueden también producirse tiosulfatos, tetracionatos y politionatos, pero cuantitativamente estas reacciones intervienen en corta proporción en el ciclo general del azufre (19).

Burges (19) afirma que existe cierto paralelismo entre las reacciones bioquímicas del nitrógeno y azufre en los suelos, si bien las producciones de compuestos oxidados y reducidos del azufre son cuantitativamente inferiores a las correspondientes del nitrógeno.

2.5. Mineralización del azufre en el suelo

Puesto que los cultivos y las otras formas de vegetación requieren para su crecimiento el sulfato que se encuentra en su sistema radicular, la mineralización del azufre orgánico llevada a cabo por el metabolismo microbial juega un importante papel en los requerimientos nutricionales de las formas superiores de vida (3). De acuerdo con Freney (42) y Blasco (16), el proceso de mineralización en los suelos está afectado por los factores siguientes: a) adición de materiales orgánicos que provocan la inmovilización; b) temperatura cuyo óptimo es 35°C; c) humedad con mejor efecto cuando se aproxima a la capacidad de campo y d) PH, las cantidades de azufre que se mineralizan en los suelos no estan correlacionadas con el pH de los mismos. No obstanté, cuando a un suelo se le ajustan

distintos pH, hay tendencia al aumento de mineralización con incremento de pH (42, 16).

Se ha sugerido que la mineralización del azufre depende de la naturaleza de la materia orgánica adicionada, y bajo condiciones en las cuales ocurre deficiencia de azufre, dicha materia orgánica tenderá a ser relativamente baja en este elemento. Por eso, como muchos estudios de mineralización del azufre son hechos en áreas deficientes en este nutriente, es posible que pocos trabajos hayan podido medir apreciable mineralización (9).

White (83) al incubar suelos deficientes en azufre, luego de encalar aquellos de pH bajo, encontró que la cal incrementa el S-SO₄ formado para un tiempo dado, con respecto a suelos sin encalar. Este autor sugiere que la causa de la aceleración en la formación de sulfatos solubles puede ser independiente de las funciones de la cal en el suelo.

Barrow (8) adicionó a tres suelos una solución de sucrosa (0-0,75-1,5% de suelo) y cloruro de amonio para conseguir una relación C:N de 12:1, y encontró que el nivel más bajo de sucrosa fue suficiente para inmovilizar todo el sulfato soluble en agua. Por otro lado con solución de cloruro de calcio, el sulfato extraíble se redujo a cero.

Frederick et al. (39) estudiaron el metabolismo de diferentes productos orgánicos azufrados y encontraron que estos se descomponen en el suelo a ratas diferentes, siendo los compuestos que exhibieron más rápida transformación: cistina, taurina, taurocolato de sodio, ácido sulfosalicílico y sulfoxilato formaldehído de sodio. Por otra parte, la abundancia de microorganismos del suelo aumentó cuando se adicionaron aquellos compuestos

orgánicos de los cuales se formó sulfato.

Granados (46) al estudiar la mineralización de azufre en suelos (Inceptisoles, Distropeptos) bajo cultivo de cacao encontró una alta actividad metabólica, detectando S-SO₄ en todas las determinaciones químicas. En la primera semana de incubación se efectuó la mayor mineralización. Adiciones de S inorgánico aumentaron la mineralización al igual que en algunos casos la aplicación de nitrógeno. Por el contrario las adiciones de P, K y Mg hicieron disminuir la producción de S-SO₄.

Estudiando el efecto de ciertos tratamientos sobre el metabolismo del azufre, Blasco (18) encontró que en ninguno de los suelos incubados hubo producción apreciable de SH₂ para 0,01 y 0 bares. A iguales niveles de tensión, la adición de 1% de celulosa aumentó las condiciones reductoras. Consiguió ganancias netas de azufre con tratamientos de (PO₄H₂)₂ Ca y (NO₃)₂ Ca. El encalamiento (CO₃Ca en solución) no mejoró la producción de sulfatos y la aplicación de azufre tuvo efectos variables.

2.6. Actividad metabólica del suelo

La producción de anhídrido carbónico en incubación es uno de los índices más frecuentemente usados de la actividad microbial del suelo (67). La medida del O₂ o del CO₂, constituye un método adecuado para cuantificar el potencial bioquímico de los suelos (22).

Agarwal et al. (1) indican que la mineralización del carbono fue mayor en muestras incubadas después de ciclos secamiento-rehumedecimiento, que en aquellas sometidas solo a incubación. Sugieren que en adición a la estimulación microbial a través del secamiento (60°C), el calor fue responsable

directamente de la mayor cantidad de N y C liberados en muestras no incubadas por alteración química de la materia orgánica y por muerte de organismos.

Las pérdidas más grandes de C orgánico por mineralización ocurrieron cuando se drenaron suelos inundados o pobremente drenados. El grado de pérdidas decrece con la disminución del contenido de humedad antes del drenaje (34).

Cuando se incubaron suelos en condiciones variables de humedad, de cero de tensión a suelo seco al aire, el CO_2 liberado durante el primer día se incrementó de un mínimo en suelo seco al aire a un máximo con tensiones de 0,50 a 0,15 bares, disminuyendo con mayor humedad del suelo. Al final de la incubación (14 días) hubo poca diferencia en el CO_2 desprendido en el intervalo de tensión de 0,50 a 0,15 bares (64). En suelos volcánicos la evolución de CO_2 se produjo a todas las tensiones de humedad estudiadas. La más alta producción correspondió a 0,3 bares, mientras que la menor se presentó en condiciones de anegamiento (17). Un cambio reducido de humedad entre el punto de marchitez permanente, muy alto en suelos de cenizas y la humedad equivalente, se refleja en una variación importante en el desprendimiento de CO_2 (29). En suelos bajo cultivo de cacao incubados a 0,3 bares se encontró en promedio, una actividad metabólica elevada, que fue de 139 mg CO_2 /1000 g de suelo (45).

3. MATERIALES Y METODOS

3.1. Area de estudio

3.1.1. Localización y descripción general

El área de estudio está localizada dentro de la Región Pacífica de Nicaragua, de la cual Marín (59) anota las siguientes características:

Se encuentra en una franja de 60 a 80 kilómetros de ancho aproximadamente que se distribuye de N.O. a S.E., paralelamente a la costa del Pacífico, entre los 11° y 13° de latitud Norte y $85^{\circ} 30'$ y $87^{\circ} 45'$ de longitud Oeste. En la Figura 20 del Apéndice se observa la localización de los suelos estudiados.

El clima de la mayor parte de la región se caracteriza por presentar temperaturas cálidas, 22 a 37°C , durante todo el año, con medias superiores a 24°C . La precipitación anual fluctúa entre 900 y 1.900 mm, distribuyéndose en un período de seis meses comprendido entre mayo y noviembre y un período seco entre diciembre y abril. De acuerdo al sistema de Holdridge se encuentran las formaciones de Bosque Tropical Muy Seco y Bosque Tropical Seco.

Geológicamente permanecen intactos numerosos aparatos volcánicos del pelistoceno, siendo la litología dominante de piroclastos y flujos lávicos; algunos de estos volcanes permanecen aun activos.

Los suelos se han derivado a partir de diferentes tipos de materiales volcánicos principalmente de composición básica como: diversos tipos de

tobas, brechas y aglomerados, flujos lávicos basálticos y andesíticos, ignimbritas, lapilli de basalto, pómez, etc. Los suelos de la región se agrupan en los órdenes Vertisoles, Inceptisoles y Mollisoles.

3.1.2. Suelos estudiados

El área contemplada en este estudio, donde se localizan las series que se describen a continuación ocupa una superficie muy aproximada de 250 km².

a) Serie La Lapa

Está formada por suelos derivados de cenizas volcánicas básicas de color oscuro, profundos, oscuros a pardo oscuros y bien drenados. Se encuentran sobre depósitos volcánicos más viejos de colores claros. Tienen una permeabilidad de moderada a moderadamente rápida, capacidad de humedad disponible que no llega a ser alta, y zona radical profunda. Tienen contenido alto de materia orgánica en las capas superficiales y medio en el subsuelo. Poseen buena cantidad de bases, los suelos. La saturación de bases del subsuelo está alrededor del 75%. El contenido de potasio va de medio a alto, pero el fósforo es bajo (66).

A pesar de la descripción presentada en el punto anterior las observaciones de campo indican que el drenaje de los lotes muestreados es deficiente, ocasionado por la topografía y acumulación de arcilla en los perfiles a partir de los 30 cm de profundidad.

b) Serie Chinandega

Esta serie está formada por suelos francos derivados de cenizas volcánicas recientes, profundos y bien drenados, con capacidad

de humedad disponible alta, y zona radical profunda. La cantidad de materia orgánica es alta en la superficie del suelo y media en los estratos subsuperficiales y en el subsuelo. Los suelos están bien provistos de bases y tienen una saturación de bases de aproximadamente 60%. Tienen alto potasio aprovechable pero son bajos en fósforo (66).

c) Serie La Mora

La forman suelos derivados de cenizas volcánicas de textura medianamente gruesa, de profundidad moderada y bien drenados, con regular capacidad de humedad disponible, y una zona radicular profunda. La superficie del suelo tiene alto contenido de materia orgánica, el subsuelo es medio, los suelos son moderadamente altos en bases cambiables; la saturación de bases del subsuelo va de 45 a 50%. Los suelos son bajos en fósforo aprovechable. El contenido de potasio es medio (66).

d) Serie Chichigalpa

Los suelos que constituyen esta serie son francos, pardo oscuros en la superficie y con un subsuelo pardo amarillento oscuro, profundos, bien drenados, con capacidad de humedad disponible aproximadamente alta, y zona radical profunda. El contenido de materia orgánica es moderadamente alto en la superficie y regular en el subsuelo. Los suelos tienen buena provisión de bases, que en el subsuelo es mayor de 80%. Son suelos medios en potasio aprovechable pero deficientes en fósforo (66).

e) Serie Telica

Está formada por suelos profundos, bien drenados, pardos muy oscuros, desarrollados de cenizas volcánicas recientes y un suelo

enterrado de textura fina, con capacidad de humedad disponible que va de moderadamente alta a alta, y zona radical profunda. El contenido de materia orgánica es medio, y los suelos tienen buen abastecimiento de bases, que supera el 65%. Los suelos son bajos en fósforo aprovechable, mientras que el contenido de potasio es medio (66).

En el Cuadro 1 del Apéndice se presentan algunas características generales de los suelos estudiados.

3.2. Muestreo y preparación del suelo

Se tomaron muestras de las series seleccionadas, considerándose dos perfiles por serie. La recolección de las muestras en la primera capa se realizó en una superficie de 30 x 40 m, tomándose 8-10 sub-muestras para conseguir una muestra final de 500-800 g. El muestreo en las capas inferiores se hizo con barreno. Para cada serie el muestreo se efectuó en el lote donde previamente la Oficina de Catastro y Recursos Naturales de Nicaragua había localizado el perfil modal y en otro sitio intermedio.

Por separado se tomaron muestras de las primeras capas en todas las series, con juegos de anillos metálicos, con el propósito de determinar curvas de desorción de los suelos. Igualmente, se utilizaron cilindros metálicos de volumen conocido, para determinar densidad aparente.

Las muestras de suelos recolectadas para la prueba de incubación y determinaciones químicas fueron secadas al aire y pasadas por un tamiz con mallas de 2 mm.

3.3. Procedimiento experimental

A muestras de 10 g de suelo, correspondientes a las series La Lapa

y La Mora, que se seleccionaron por pertenecer a las zonas más próximas al Océano Pacífico y los volcanes El Chonco y San Cristóbal respectivamente, se les aplicaron tratamientos de glucosa, N, P, Ca, Mg y S, de acuerdo a un diseño irrestrictamente al azar. Se incubaron en tubos de ensayo cerrados con tapones de hule, a capacidad de campo, 0,33 bares de retención de humedad, correspondientes a 44,05% y 45,70% de humedad gravimétrica para las series La Lapa y La Mora, respectivamente. La aeración se suministró con peróxido e hidróxido de bario (22), durante períodos de 1, 2, 4 y 6 semanas a temperaturas de 28 a 30°C. Los elementos y niveles que se aplicaron en la prueba de incubación fueron los siguientes:

N	0	25	50	100	200	ppm
P	0	50	100	200	400	ppm
Ca	0	50	100	200	400	ppm
Mg	0	25	50	100	200	ppm
S	0	25	50	100	200	ppm
Glucosa	0	50	100	200	400	ppm

Se utilizaron reactivos de laboratorio: NH_2CONH_2 como fuente de N; $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ como fuente de P; CaCO_3 como fuente de Ca; MgO como fuente de Mg; y Na_2SO_4 como fuente de S.

Al concluir cada período de incubación se determinaron el S- SO_4 intercambiable, extraído con $(\text{PO}_4\text{H}_2)_2\text{Ca}$, y el CO_2 , como expresión de la actividad metabólica microbial por el método del peróxido de bario, tal como se referencian en el punto siguiente.

3.4. Métodos analíticos

En todas las series de suelos y para todas las profundidades conseguidas se determinaron las siguientes formas de azufre: total, orgánico, inorgánico, intercambiable con tres soluciones extractoras diferentes, soluble en agua y reserva del suelo. También se determinaron CIC, pH, carbono orgánico, textura, densidad aparente, densidad de partículas y constantes de humedad (ver Cuadro I del Apéndice).

Azufre total: ignición y digestión con nitrato de potasio y ácido nítrico de acuerdo a Chaudry (28). Se modificó realizando una predigestión con ácido nítrico-ácido perclórico. La modificación completa aparece descrita en el Apéndice.

Azufre orgánico: ignición a 500°C y extracción con fosfato de calcio según el método propuesto por Barsdley y Lancaster (11).

Azufre inorgánico: por diferencia entre las formas total y orgánica.

Azufre intercambiable: extracciones con $(\text{PO}_4)_2\text{H}_2\text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ y $\text{PO}_4\text{H}_2\text{K}$ siguiendo los métodos de Fox et al. (38) y Ensminger (35).

Azufre soluble en agua: de acuerdo al método propuesto por Chaudry (28).

Azufre reserva del suelo: por diferencia entre las fracciones orgánica e intercambiable.

Después de las diferentes extracciones, el azufre se estimó turbidimétricamente como sulfato, siguiendo la técnica de Massoumi y Cornfield (60).

Para la determinación de CO_2 se siguió el método propuesto

por Cornfield (22), que se basa en la reacción del CO_2 con el bario para formar Ba_2CO_3 .

pH: se determinó en agua relación 1:1, efectuando las lecturas en un potenciómetro Beckman modelo 96 con electrodo de vidrio (69).

Carbono orgánico: se utilizó el método de Walkley-Black, descrito por Saiz del Río y Bornemisza (73).

Materia orgánica: a partir del valor de carbono orgánico, multiplicando por el factor 1,724.

Capacidad de intercambio Catiónico: empleando el método del cloruro de calcio propuesto por Fuentes (44).

Distribución de tamaño de partículas: método del hidrómetro modificado por Day (30) y adaptado por Forsythe (37).

Densidad aparente: se utilizó la técnica del cilindro de volumen conocido descrita por Blake (14) y Forsythe (37).

Densidad de partículas: método de Blake (15) modificado por Forsythe (37), utilizando kerosene como líquido desplazante.

Retención de humedad: se empleó el método de Richards (72) modificado por Forsythe (37).

3.5. Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron procesados en una computadora IBM-1130.

Para estudiar la asociación entre las diferentes formas de azufre y otras características químicas y físicas de los suelos se efectuó un análisis de correlación múltiple. La variación de todas estas características en función de la distancia y profundidad de evidenció por medio de un análisis de

superficie de respuesta; se realizaron también curvas con valores estimados en función de los parámetros.

Para el análisis del efecto de tratamientos sobre la producción de sulfatos y de CO_2 en la prueba de incubación, ajustaron modelos de tipo cuadrático y logarítmico. Se llevaron a cabo igualmente análisis de variancia de los parámetros.

4. RESULTADOS

4.1. Características generales de los suelos

En el Cuadro 1 del Apéndice se presentan algunos datos sobre las características físicas y químicas de los suelos estudiados. Los suelos mostraron una reacción próxima a la neutralidad a través de todo el perfil. Incluso en la serie Chinandega el pH es superior a 7,0 en alguno de los horizontes. El rango de pH observado fue de 5,85 a 7,40 con un promedio generalizado de 6,50.

El carbono orgánico y, por tanto la materia orgánica, tendió a disminuir con la profundidad del perfil. El máximo contenido de carbono orgánico correspondió al primer horizonte de la serie La Mora con 4,9%, mientras el menor se encontró en el cuarto horizonte de la Serie Chinandega con 0,40%. Es interesante observar que las cenizas del Volcán Cerro Negro, cuyas últimas erupciones datan del año pasado aparecen ya "contaminadas" con 0,19% de carbono orgánico.

La dispersión del suelo realizada con el método del hidrómetro modificado por Day (30) y adaptado por Forsythe (37), mostró un claro predominio de la fracción arena y limo sobre las arcillas. La mayor concentración de arena ocurrió en la serie La Mora que es la más próxima a los volcanes El Chonco y San Cristóbal. Por el contrario, los mayores porcentajes de arcilla correspondieron a la serie La Lapa, la más alejada de los volcanes y más próxima al Océano Pacífico.

La capacidad de intercambio catiónico medida con el método propuesto por Fuentes (49), dió valores comprendidos entre 12,12 y 33,36 me/100g. Los resultados obtenidos demostraron que en los perfiles estudiados la capacidad de intercambio catiónico más elevada correspondió siempre a horizontes distintos del primero. Esta capacidad de intercambio fue de 3,43 me/100 g para las cenizas de Cerro Negro.

Para los perfiles I de las series La Lapa y La Mora se consiguieron valores acerca de la composición de los sesquióxidos. En las pocas muestras determinadas Al_2O_3 apareció con el porcentaje más alto. Por el contrario los porcentajes de los sesquióxidos de hierro fueron bajos. Teniendo en cuenta las dos series elegidas, por sus distancias máxima y mínima a los volcanes, es probable que estos resultados sean válidos para toda la región estudiada.

Los valores para densidad de partículas fluctuaron entre 2,45 y 2,71 g/cc, manifestándose de esta manera la diversidad de minerales que se encuentran en los suelos estudiados.

La densidad aparente que solo fue determinada para la capa superficial dió valores extremos que van de 0,86 g/cc para la serie Chinandega a 1,10 g/cc en la serie Telica. Cabe señalar que solo en esta última serie y en La Mora el valor de densidad aparente fue superior a 1,00 g/cc.

4.2. Concentración de las fracciones de azufre en los suelos

Las concentraciones de las diferentes formas de azufre y los valores de las distintas fracciones expresados en porcentajes de la concentración total de los suelos estudiados se presentan en el Cuadro 2 del Apéndice.

En general, el contenido de azufre total de los suelos varía entre 496,4 y 1.324,9 ppm, que puede considerarse algo bajo para un área con influencia de materiales volcánicos. El valor medio es equivalente a 788,9 ppm. Es de señalar que en 4 de los 9 perfiles considerados, Chinandega I, Chinandega II, La Mora II y Chichigalpa I, la concentración de S-total es menor en la capa superficial que en las inferiores. La cantidad de azufre total encontrada en la muestra de ceniza reciente del volcán Cerro Negro llega a 863,2 ppm.

Porcentualmente, la fracción orgánica del azufre en estos suelos fluctúa entre 7,95 y 51,41, resultado que si bien sigue la tendencia para suelos derivados de cenizas volcánicas, corresponde a niveles bajos. El valor promedio de esta forma es de 177,3 ppm. Las cantidades encontradas ponen de manifiesto que, como era de esperarse, la mayor concentración de azufre orgánico no siempre se consiguió en la primera capa de los suelos.

Como consecuencia de los valores obtenidos para la forma orgánica, el azufre inorgánico en estos suelos representa la mayor contribución como integrante del azufre total. Los valores extremos registrados para el S-inorgánico corresponden a 357,6 y 1.219,6 ppm, con una media de 611,7 ppm. Relativamente, la fracción inorgánica de azufre oscila entre 48,59% y 92,05%. El valor para la ceniza volcánica analizada fue de 823,4 ppm que equivale a un 95,39%.

El orden promedio creciente de extracción del azufre intercambiable fue 8,0 ppm $(\text{PO}_4)_2\text{H}_2\text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; 11,0 ppm $(\text{PO}_4\text{H}_2\text{K})$; y 14,5 ppm (CO_3Ca) .

Con excepción de solo cuatro determinaciones, el empleo de las 3 soluciones extractoras permitió evidenciar que la forma de azufre intercambiable se localiza en la primera capa de los suelos. En términos de valor medio, el agua (9,2 ppm) extrajo más azufre que el fosfato de calcio (8,0 ppm), aunque ciertas determinaciones fueron mayores con este último extractante. A su vez, con agua se extrajo menos azufre que con los otros dos extractores, $\text{PO}_4\text{H}_2\text{K}$ y CO_3Ca , empleados para determinar el S-intercambiable.

El rango de S-intercambiable extraído con $(\text{PO}_4)_2\text{H}_2\text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ varió entre 1,9 (0,37% del S-total) y 31,2 ppm (3,91%). Con $\text{PO}_4\text{H}_2\text{K}$ la oscilación fue desde trazas hasta 38,2 ppm (3,34%). Las concentraciones obtenidas con CO_3Ca estuvieron comprendidas entre 3,5 ppm (0,37%) y 77,3 ppm (4,67%). Y con el agua la variación fue desde 3,5 (0,53%) hasta 17,9 ppm (2,71%).

Los valores de la fracción azufre reserva del suelo indican que si bien las cantidades de azufre intercambiable son bajas, existe una cantidad relativamente considerable, 22,18% del S-total que a través de transformaciones bioquímicas podría ser aprovechada posteriormente por las plantas.

Utilizando $(\text{PO}_4)_2\text{H}_2\text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, se procedió a realizar una serie de extracciones sucesivas de azufre en las muestras de la primera capa para todas las series estudiadas, cuyos resultados aparecen en la Figura 1. Como puede observarse, en general, el azufre intercambiable disminuye a medida que aumenta el número de extracciones. Los valores extremos

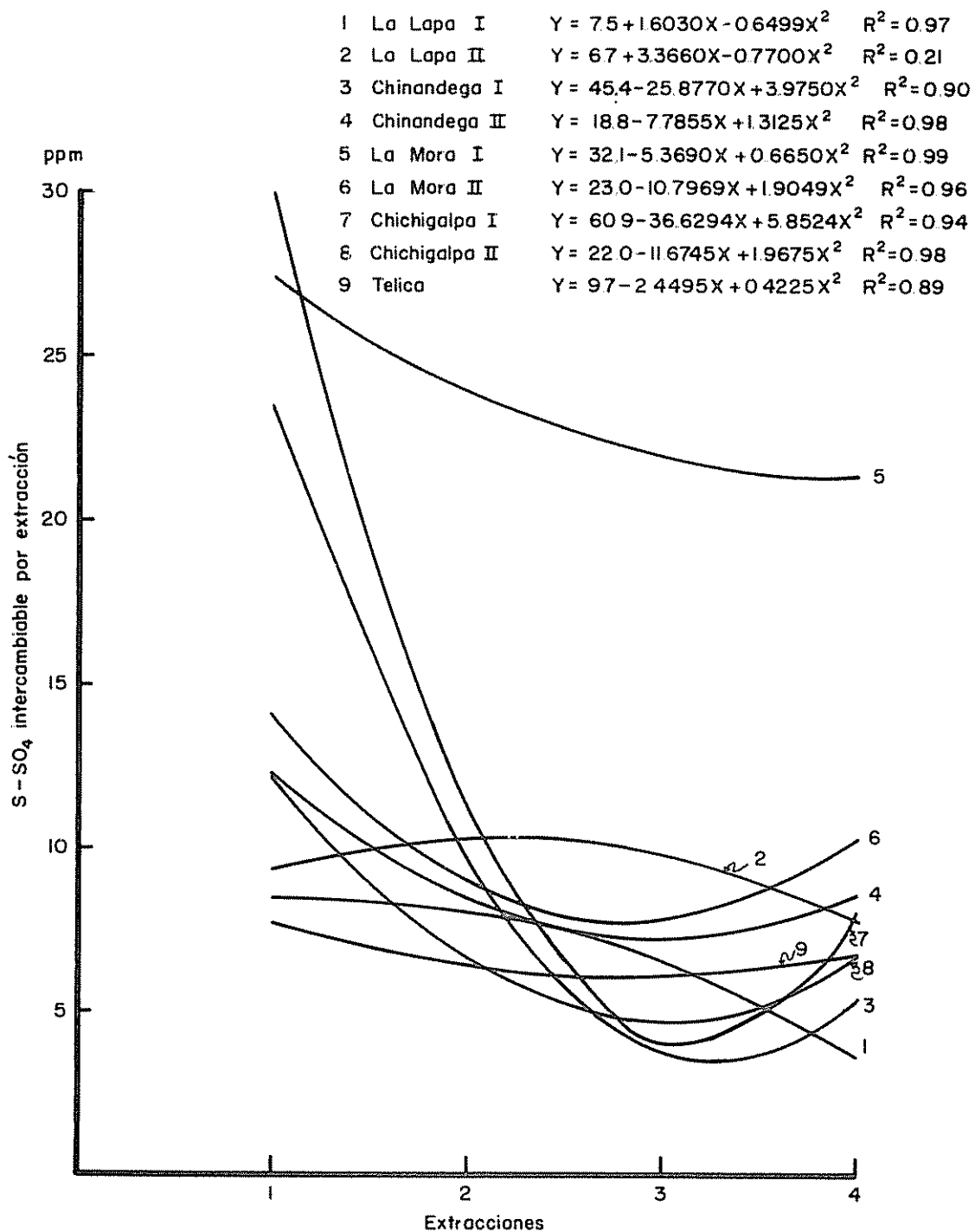


Fig. 1. Cantidades de S-SO₄ intercambiable, con (PO₄)₂H₂Ca₂H₂O en extracciones sucesivas

se consiguieron en Chichigalpa II (6,13 ppm) y La Mora I (41,96 ppm). Hay que consignar que la situación se invirtió en los suelos Chinandega I y Chichigalpa I, ya que la primera extracción superó a la suma de las otras tres con 7,06 y 9,53 ppm, respectivamente.

4.3. Relación de las fracciones de azufre

El análisis de relación de las diferentes fracciones de azufre, junto con otras características químicas y físicas de los suelos, muestra por medio de la matriz de correlación (Cuadro 3 del Apéndice) los resultados siguientes:

La matriz de correlación parece indicar que la mayoría del azufre total del suelo se encuentra en forma inorgánica y que la mayor parte del azufre reserva del suelo se halla en forma orgánica. Así mismo se observa que los extractantes $(\text{PO}_4\text{H}_2)_2\text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ y $\text{PO}_4\text{H}_2\text{K}$, para determinar el S-SO₄ intercambiable trabajan similarmente. Por el contrario el comportamiento del CO₃Ca, como extractor, difiere sensiblemente de los anteriores. El empleo del agua no parece mostrar ninguna relación con los extractantes anteriores.

Los resultados de correlación obtenidos tiende a señalar que la reacción del suelo no influye mucho en la concentración de S-SO₄ intercambiable determinado con el anión PO_4^{3-} . Sin embargo se observa que el S-SO₄ intercambiable aumenta en concentración a medida que los suelos se acidifican. Además la matriz de correlación está mostrando que, dentro de ciertos límites, el S-SO₄ intercambiable y el S-reserva del suelo aumentan con el contenido de la materia orgánica en los suelos.

Es interesante hacer notar que, dentro de las otras propiedades estudiadas en los suelos, la capacidad catiónica de cambio es dependiente del porcentaje de arcillas y no de la materia orgánica. Se evidencia también que el pH disminuye a medida que aumenta el porcentaje de materia orgánica.

4.4. Variación de las fracciones de azufre y otras características físico-químicas en función de la distancia a los volcanes El Chonco-San Cristóbal y profundidad en el perfil.

Esta evaluación se efectuó por medio de un análisis de superficie de respuesta, considerando el transecto Océano Pacífico-Volcanes El Chonco y San Cristóbal, que comprende las series La Lapa, Chinandega y La Mora. Se tomaron como puntos de referencia el primer sitio de toma de muestras (La Lapa I) y el cono del volcán San Cristóbal, basándose en los fotomapas de la Oficina de Catastro y Recursos Naturales de Nicaragua (65). La matriz de correlación generada por el análisis (Cuadro 4 del Apéndice) y constituida por los valores de algunas formas de azufre y otras características, indica lo siguiente:

Los datos obtenidos demuestran que el S-reserva del suelo y el S-SO₄ intercambiable, medido con PO₄H₂K, dependen del contenido de materia orgánica de los suelos. Por otra parte el S-orgánico tiende a disminuir a medida que aumenta el pH y el porcentaje de la fracción arcilla.

Las fracciones de $S-SO_4$ intercambiable y S -reserva del suelo disminuyen a medida que aumenta el pH, porcentaje de arcilla y la capacidad catiónica de cambio. El S -reserva del suelo influye positivamente en el incremento del $S-SO_4$ intercambiable de estos suelos.

La variabilidad del azufre orgánico, azufre reserva del suelo, pH, y porcentaje de arcilla (Figura 2, 3, 5 y 6), como resultado de la distancia a los volcánes el Chonco y San Cristóbal, y profundidad del perfil, ajustó a un modelo de tipo logarítmico. A su vez, el azufre intercambiable PO_4H_2K porcentaje de arena y capacidad de intercambio catiónico (Figuras 4, 7 y 8), en las mismas condiciones, obedecen a una función lineal.

Las mayores cantidades, entre 180 y 260 ppm de azufre orgánico (Figura 2) se encuentran en los sitios más próximos al volcán (10 y 15 km) y se localizan en los primeros 10 centímetros del perfil. El azufre orgánico disminuye gradualmente conforme la distancia de los suelos a los volcánes El Chonco y San Cristóbal aumenta. Así mismo su contenido decrece a medida que la profundidad del perfil se hace mayor. Un comportamiento semejante, tanto para distancia como para profundidad, se encontró en el caso del azufre reserva del suelo (Figura 3) y del $S-SO_4$ intercambiable (Figura 4).

La variación del pH (Figura 5) en los suelos de esta región nicaraguense es pequeña ya que la mayor parte de sus valores fluctúa entre 6,2 y 6,8, correspondiendo las cifras más altas a los suelos localizados a la distancia entre 20 y 35 km. En toda la región el pH de los suelos aumenta con la profundidad del perfil.

La distribución de la arcilla aparece bien definida (Figura 6). Su porcentaje aumenta a medida que la localización de los suelos se aleja de los

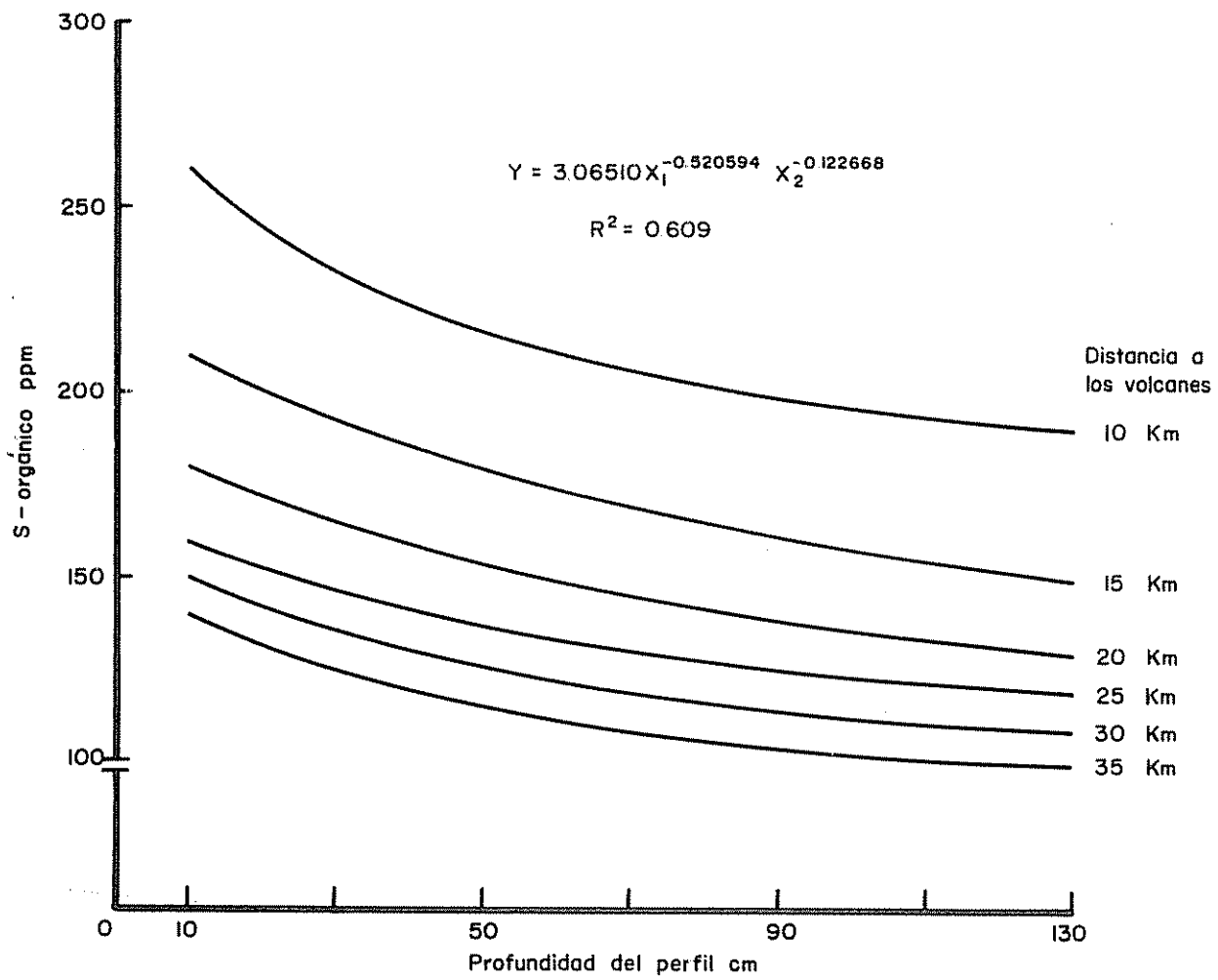


Fig. 2. Variabilidad en la concentración de S- orgánico como resultado de la distancia a los volcanes El Chonco y San Cristóbal, y profundidad del perfil

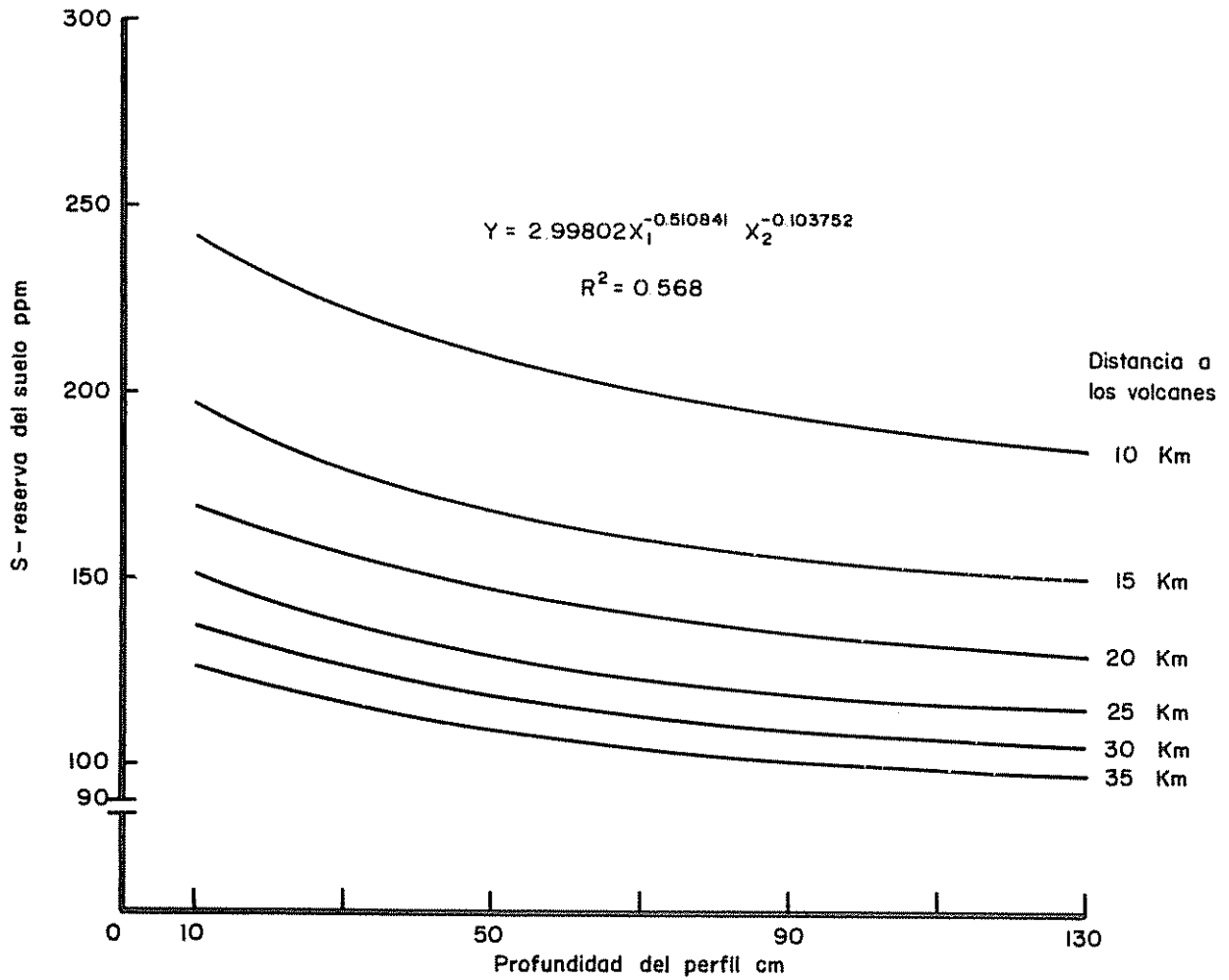


Fig. 3. Variabilidad en la concentración de S-reserva del suelo como resultado de la distancia a los volcanes El Chonco y San Cristóbal, y profundidad del perfil

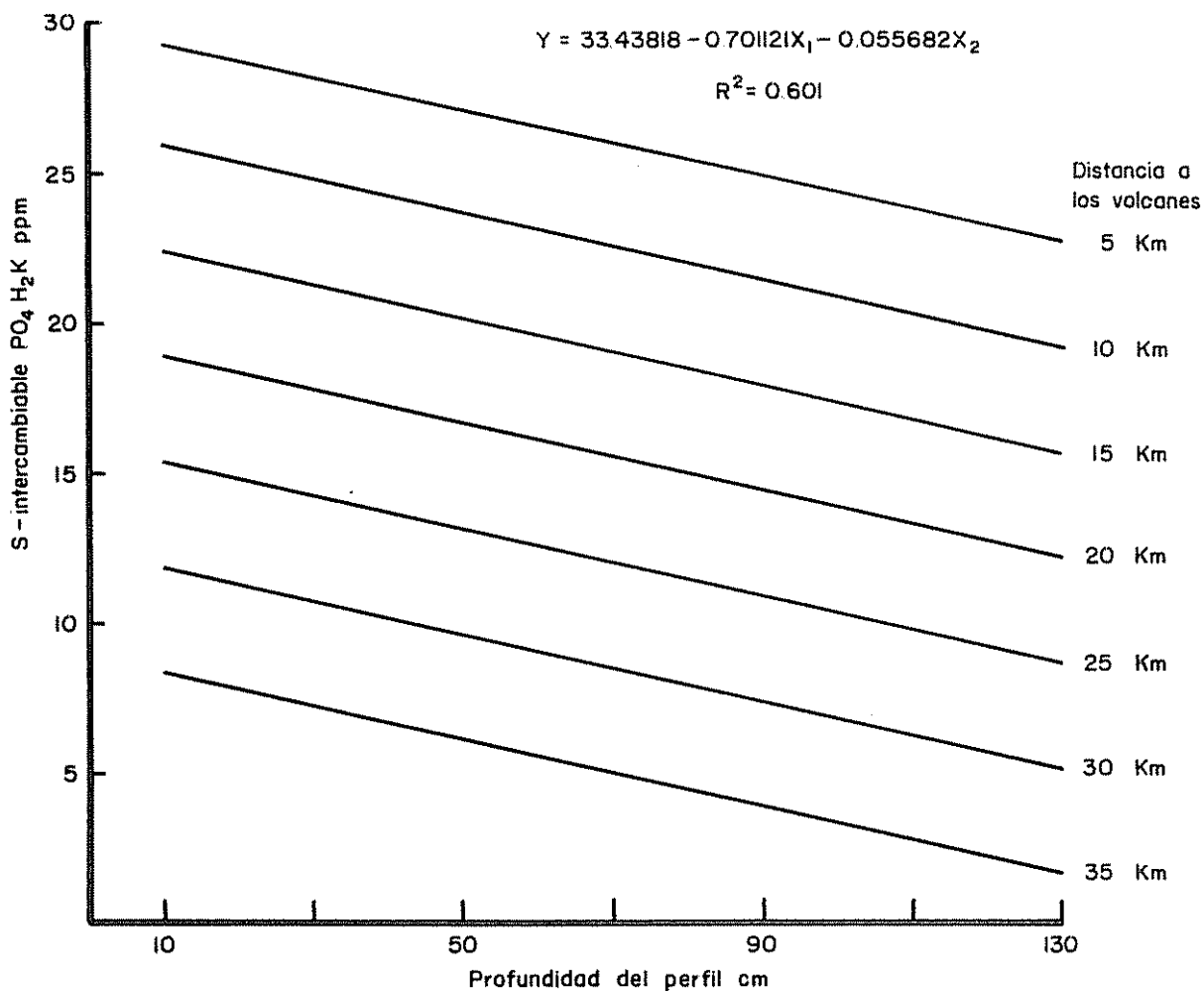


Fig. 4. Variabilidad en la concentración de S-intercambiable PO₄ H₂K como resultado de la distancia a los volcanes El Chonco y San Cristóbal, y profundidad del-perfil

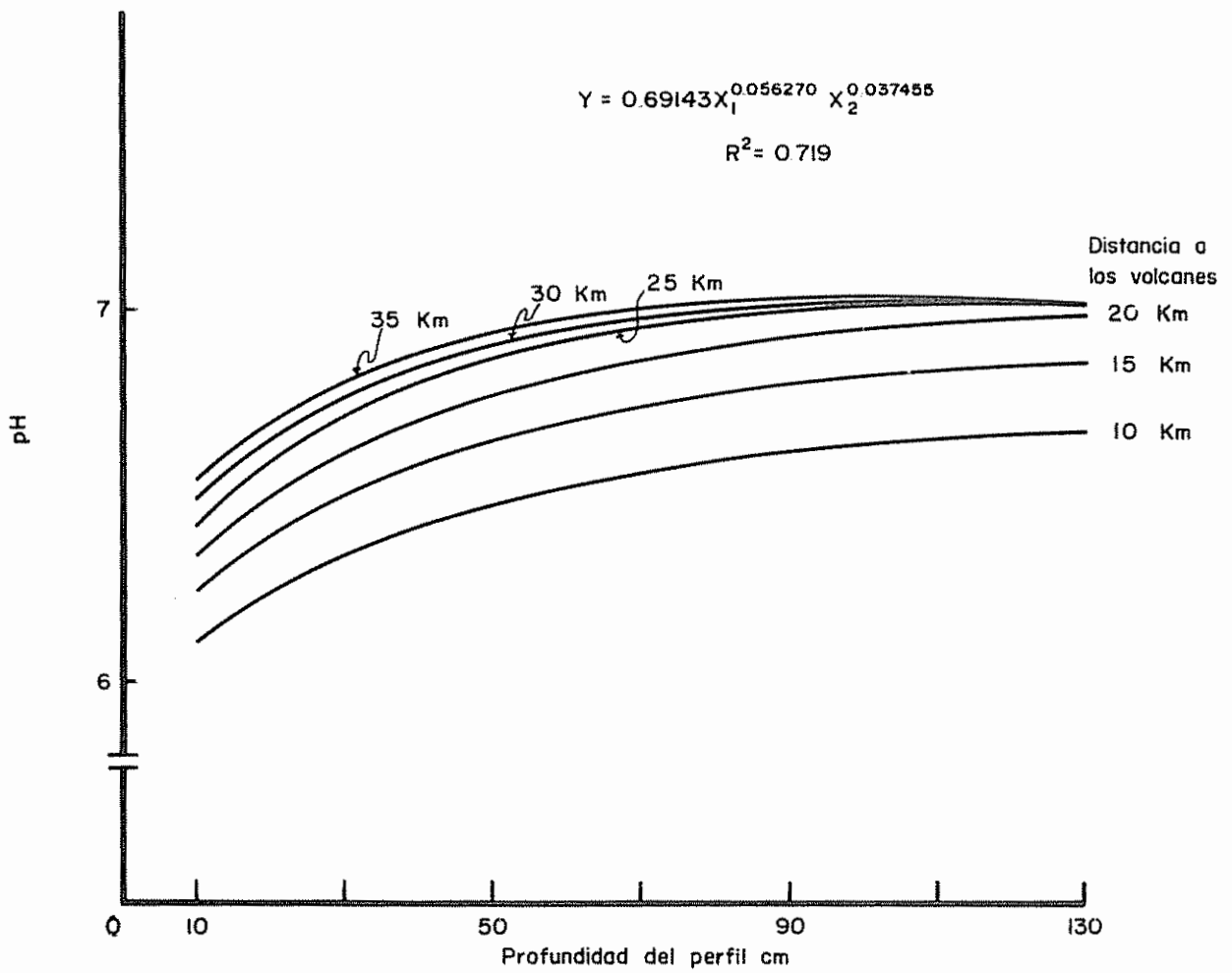


Fig. 5. Variabilidad en el pH como resultado de la distancia a los volcanes El Chonco y San Cristóbal, y profundidad del perfil

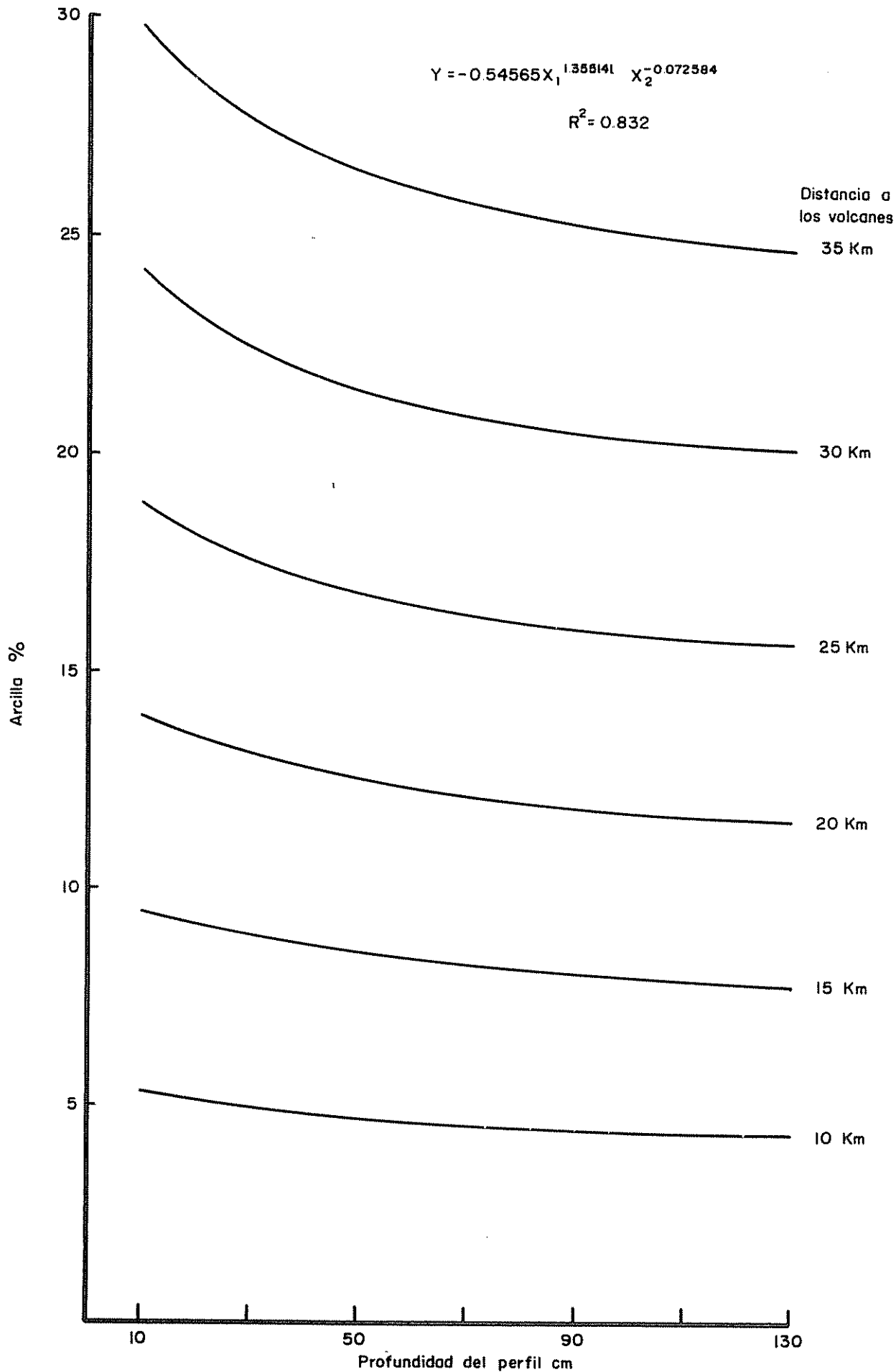


Fig. 6. Variabilidad en el porcentaje de arcilla como resultado de la distancia a los volcanes El Chonco y San Cristóbal, y profundidad del perfil

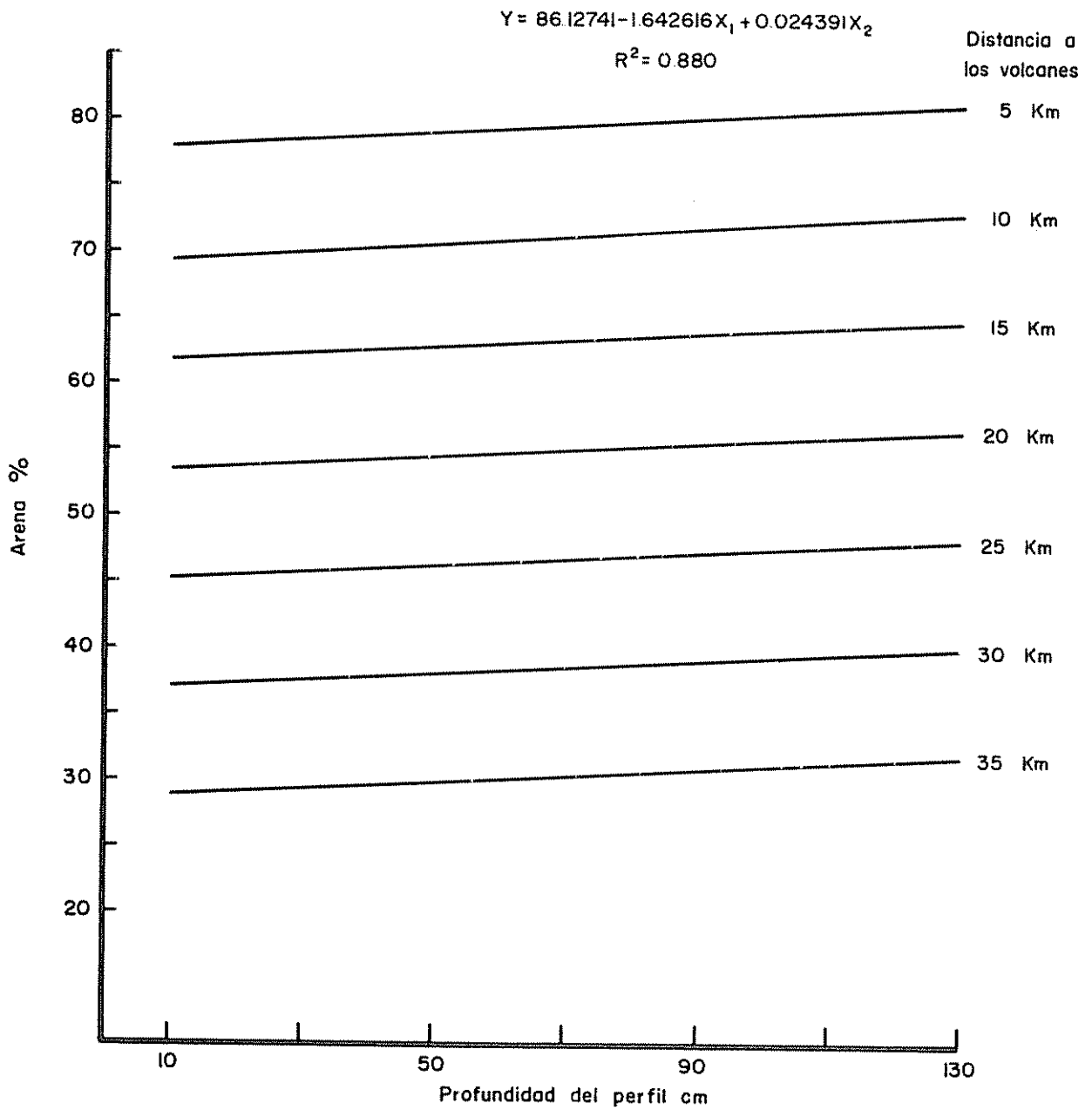


Fig. 7. Variabilidad en el porcentaje de arena como resultado de la distancia a los volcanes El Chonco y San Cristóbal, y profundidad del perfil

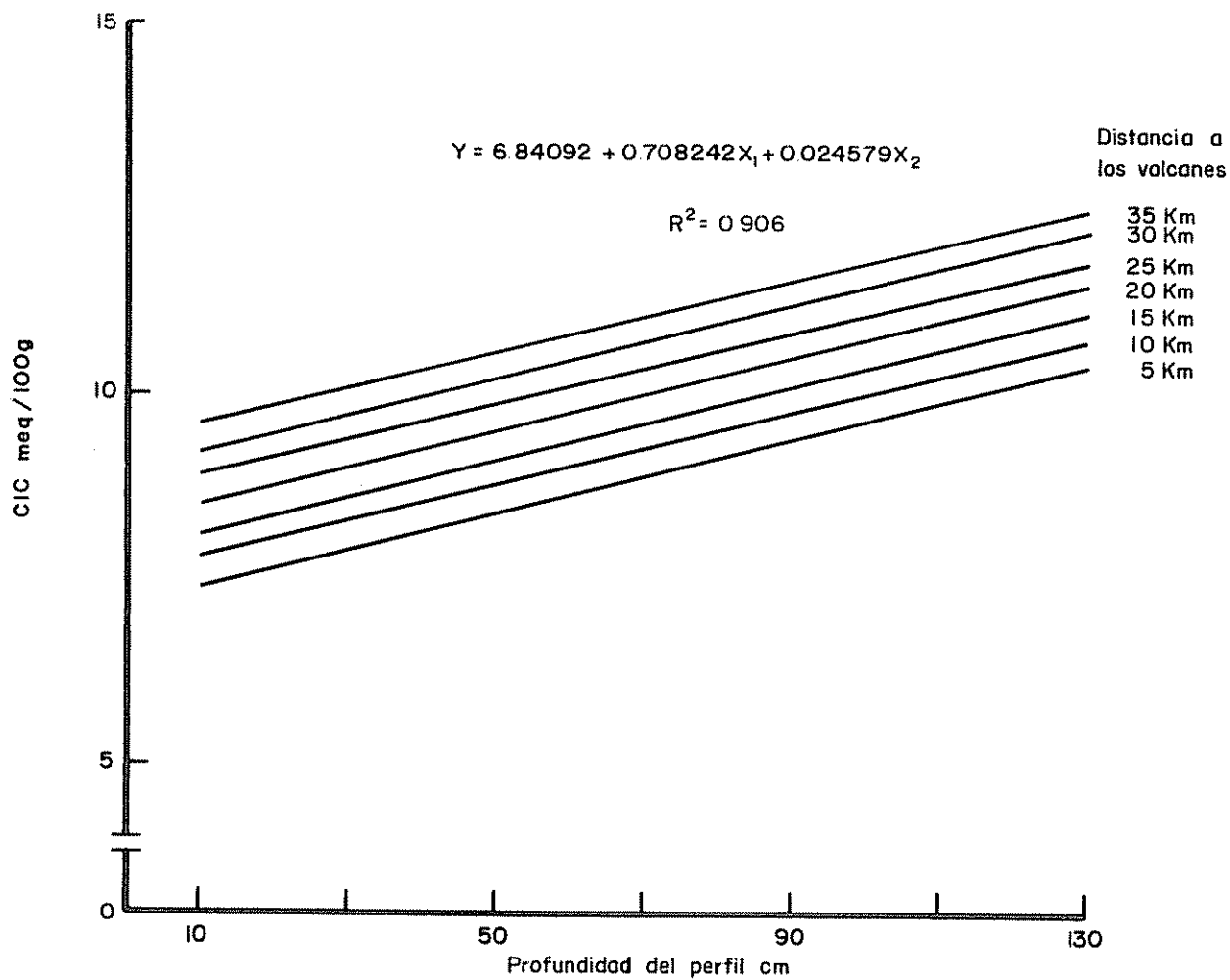


Fig. 8. Variabilidad en la capacidad de intercambio catiónico como resultado de la distancia a los volcanes El Chonco y San Cristóbal, y profundidad del perfil

volcánes El Chonco y San Cristóbal. También se observa que el mayor porcentaje de arcillas se acumula en los primeros 10 cm del perfil. Con relación a la arena los resultados presentados en la Figura 7, muestran un comportamiento inverso al anotado para la arcilla.

La capacidad de intercambio catiónico de estos suelos (Figura 8) aumenta a medida que se profundiza en el perfil. Así, para una distancia de 5 kilómetros a 10 cm de profundidad su valor es de 7,4 meq/100 g, en cambio, para esta misma distancia pero a profundidad de 130 cm se consigue un valor de 10,2 meq/100 g. Igual tendencia se observa para todas las distancias consideradas. La variación de la CIC con la distancia es menos marcada en todos los casos.

4.5. Prueba de Incubación

4.5.1. Efecto de la adición de distintos elementos en la mineralización e inmovilización del azufre

Los cambios de la concentración del azufre asequible ocurridos en diferentes lapsos de incubación en las muestras del suelo (primer horizonte) de las series La Lapa y La Mora pueden verse en los Cuadros 5 y 6 del Apéndice.

La inmovilización, y la retención en forma no directamente asequible del azufre mineralizado, prevalecieron sobre el fenómeno de mineralización. Este principio es válido también para el caso del tratamiento con S-inorgánico por cuanto las cantidades recobradas después de las incubaciones fueron menores que las adicionadas al inicio del experimento. Cuantitativamente las concentraciones de azufre detectadas en las incubaciones

con el suelo La Mora fueron mayores que las correspondientes al suelo La Lapa, ocasionado por el hecho de que el primer suelo tenía originalmente disponibles 27,5 ppm de azufre asequible mientras que en La Lapa solo había 8,7 ppm.

4.5.2, Efecto de la adición de distintos elementos en la producción de sulfato

La acción de los elementos adicionados sobre la producción de sulfatos se observa en los Cuadros 5 y 6 del Apéndice y en las Figuras 9 a 13, en las que se presentan dos niveles.

Las curvas de producción de sulfatos en función de los elementos aplicados durante el tiempo de incubación, ajustaron a modelos de tipo cuadrático y logarítmico en general.

El análisis de variancia de las tasas de producción de sulfatos (Cuadros 7 y 8 del Apéndice) indicó que existe un efecto significativo de los diferentes elementos al nivel de 1% en el suelo La Lapa y al nivel de 5% en el suelo La Mora. Debe señalarse, que el análisis de variancia considera la producción de sulfato sin tener en cuenta la mineralización neta, y sobre esta base hay que tomar en cuenta el efecto de los elementos.

Las curvas de producción de sulfatos tanto para el suelo La Lapa como para el suelo La Mora evidencian que existe en varios casos una época crítica, la cuarta semana, para la formación de sulfato. A partir de este punto se observa cómo el fenómeno de inmovilización es menos fuerte.

En términos de tasa media de producción de sulfato y para el suelo La Lapa, el efecto favorable de los diferentes elementos sobre una menor

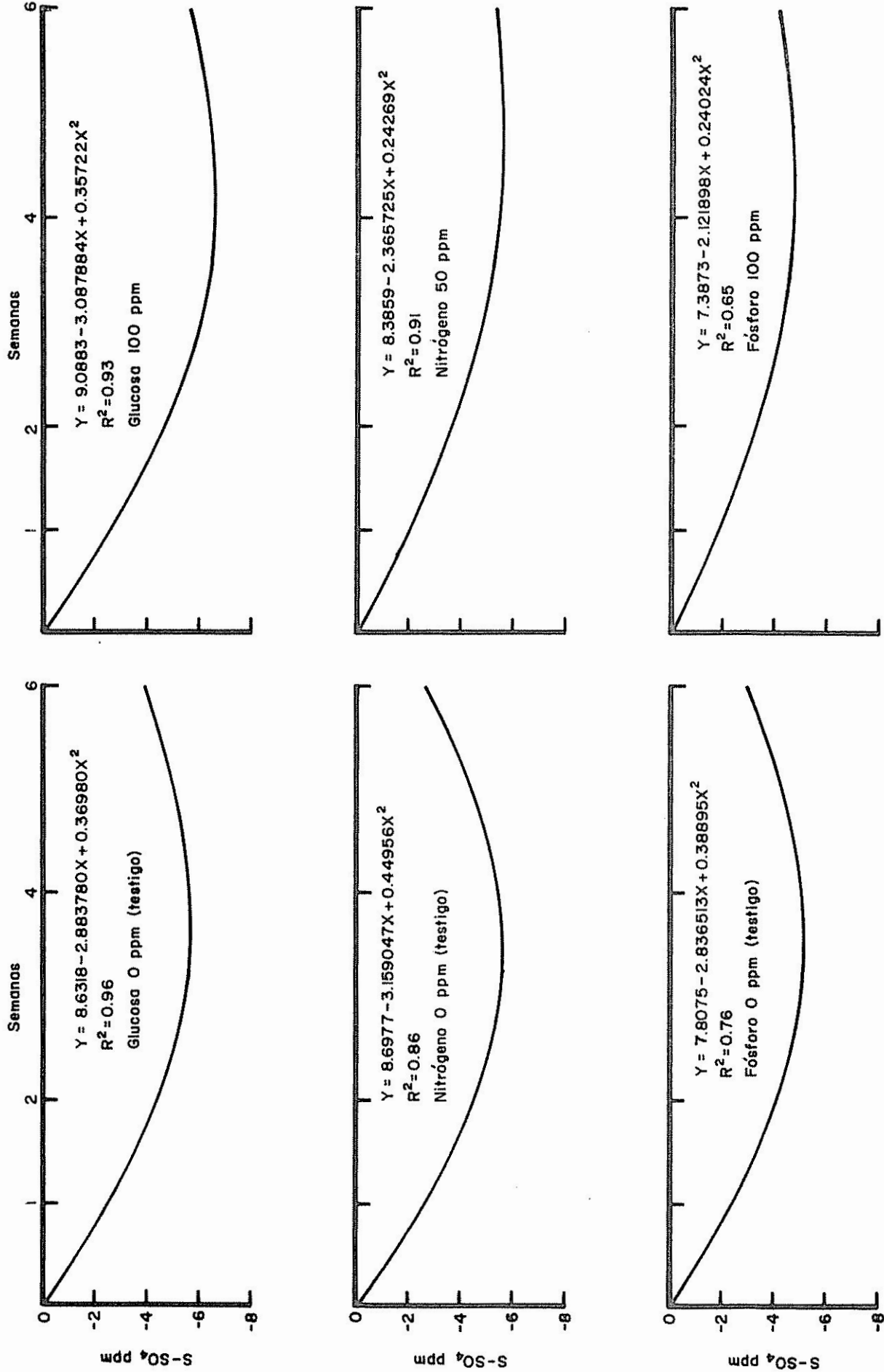


Fig. 9. Cambio en la concentración de S - SO₄ en el suelo La Lapa por efecto de la adición de glucosa, nitrógeno y fósforo (O: valor original, +: mineralización, -: inmovilización)

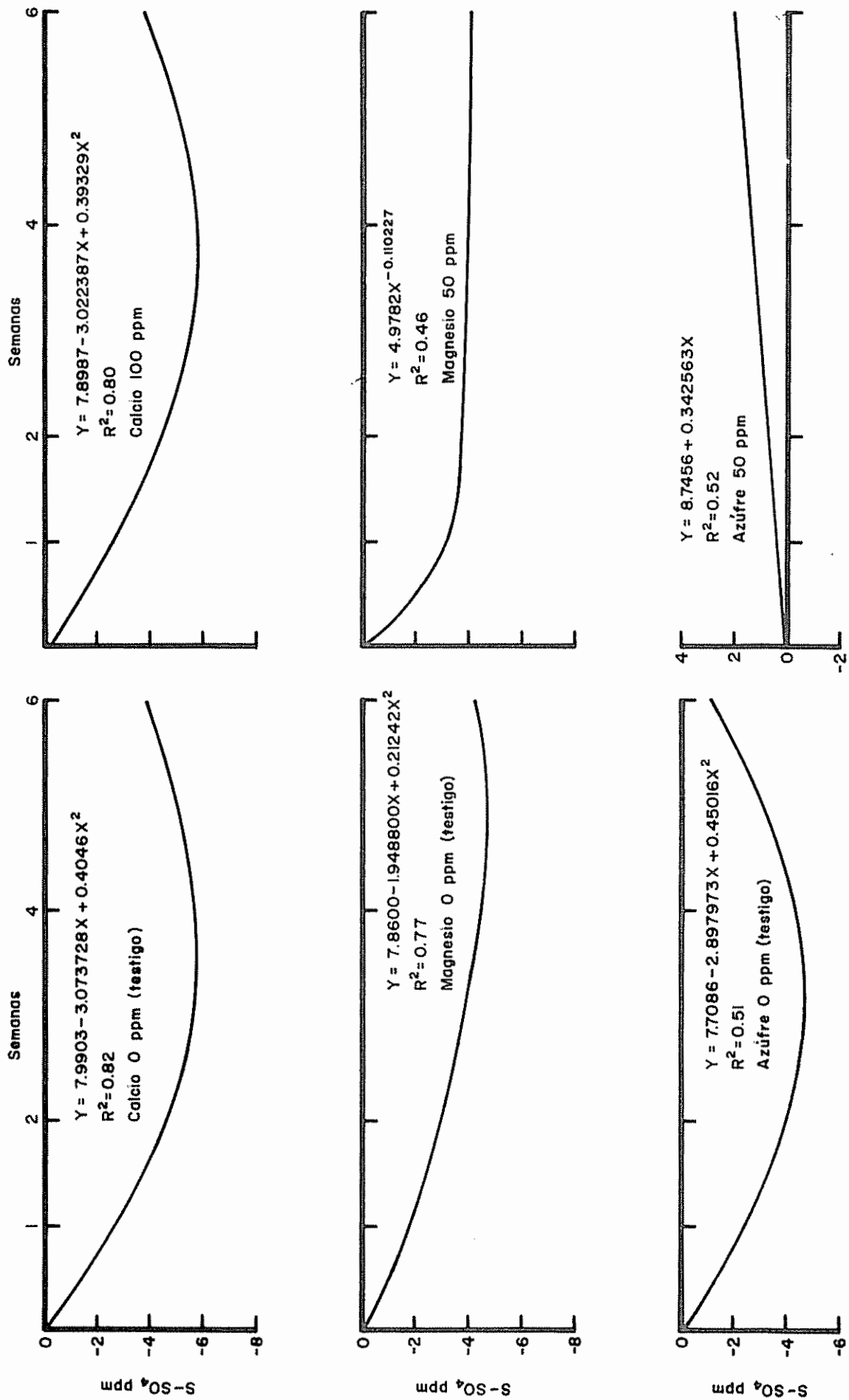


Fig. 10. Cambio en la concentración de S-SO₄ en el suelo La Lapa por efecto de la adición de calcio, magnesio y azúfre (O: valor original, +: mineralización, -: inmovilización)

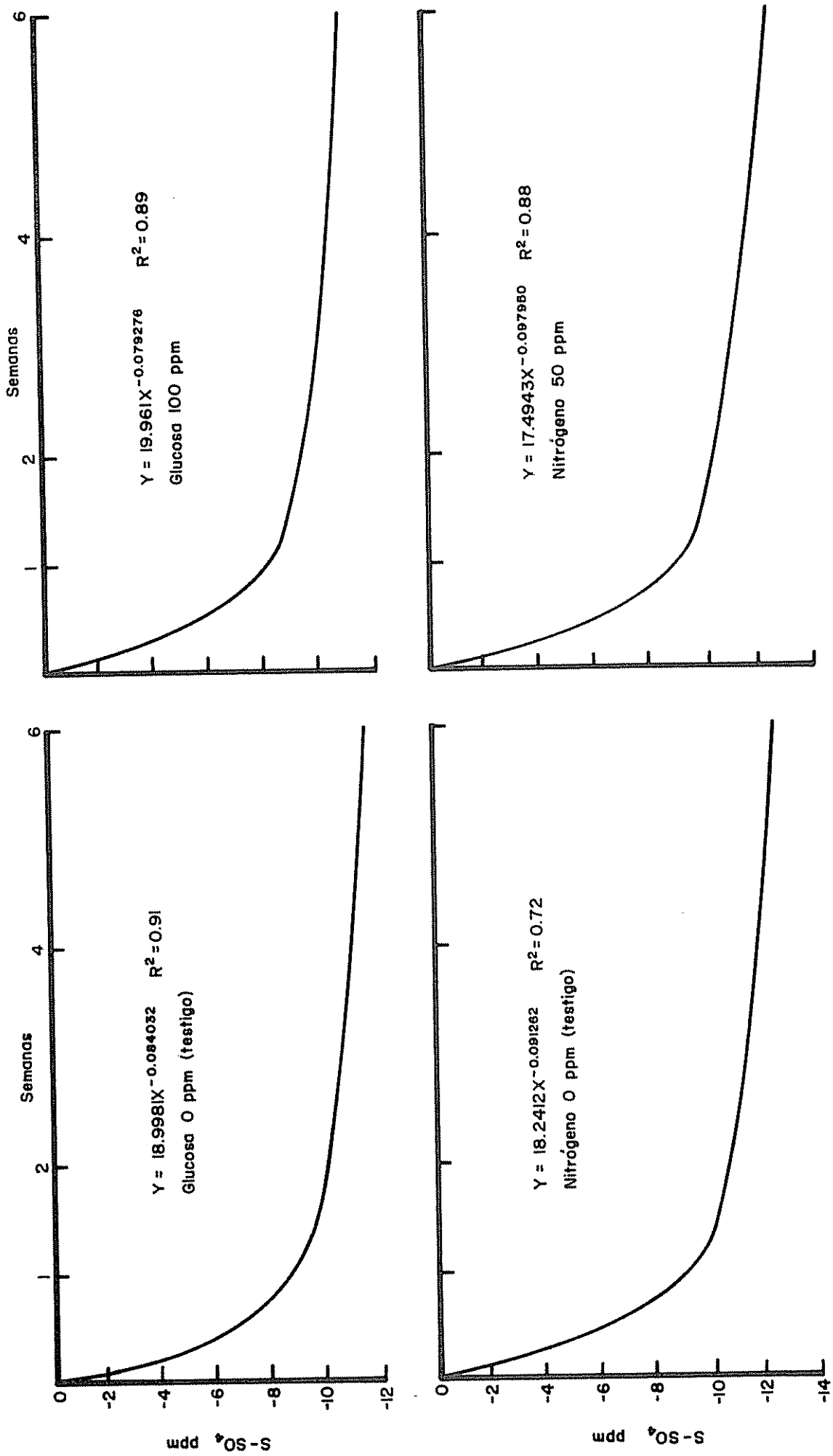


Fig. 11. Cambio en la concentración de S-SO₄ en el suelo La Mora por efecto de la adición de glucosa y nitrógeno (O: valor original, +: mineralización, -: inmovilización)

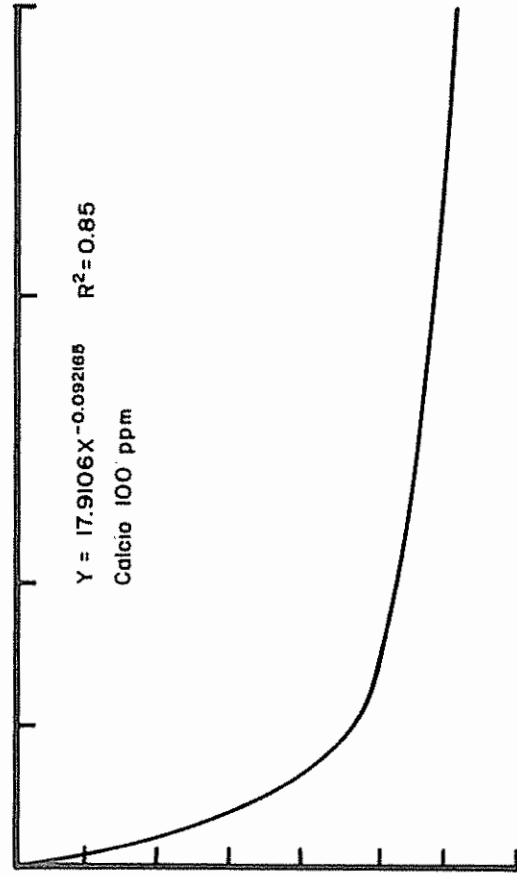
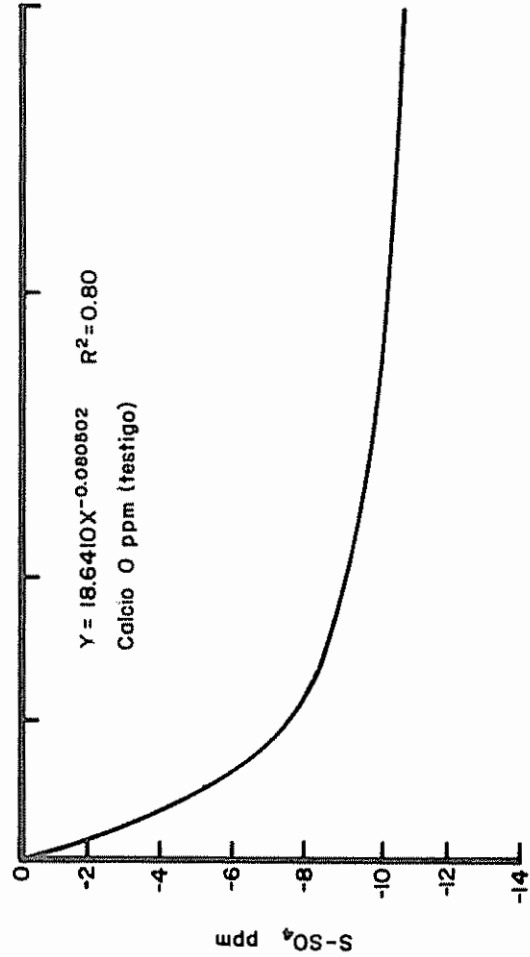
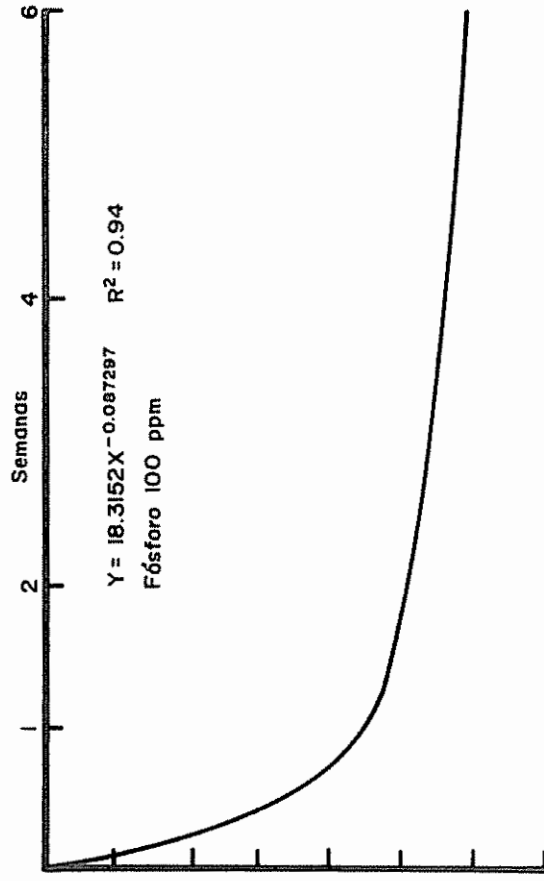
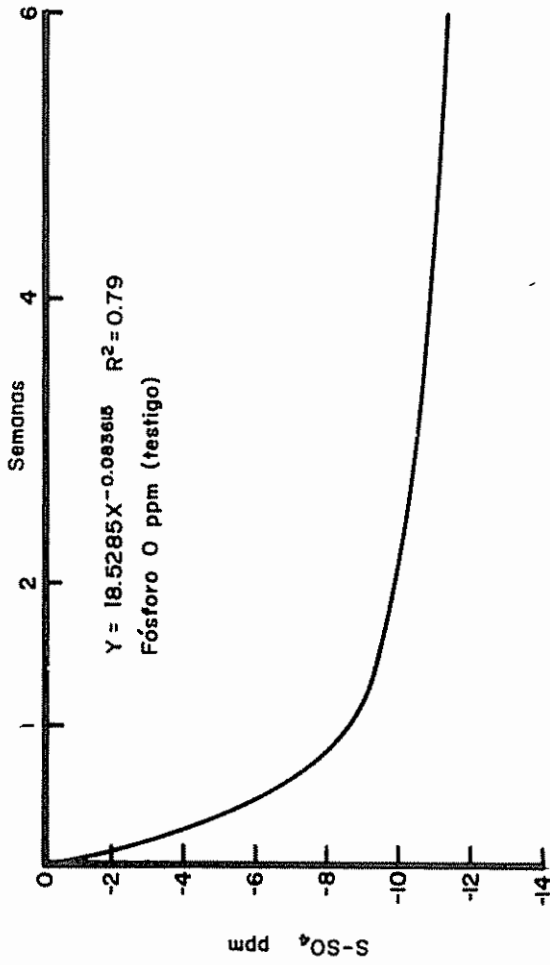


Fig. 12. Cambio en la concentración de S-SO₄ en el suelo La Mora por efecto de la adición de fósforo y calcio (O: valor original, + : mineralización, - : inmovilización)

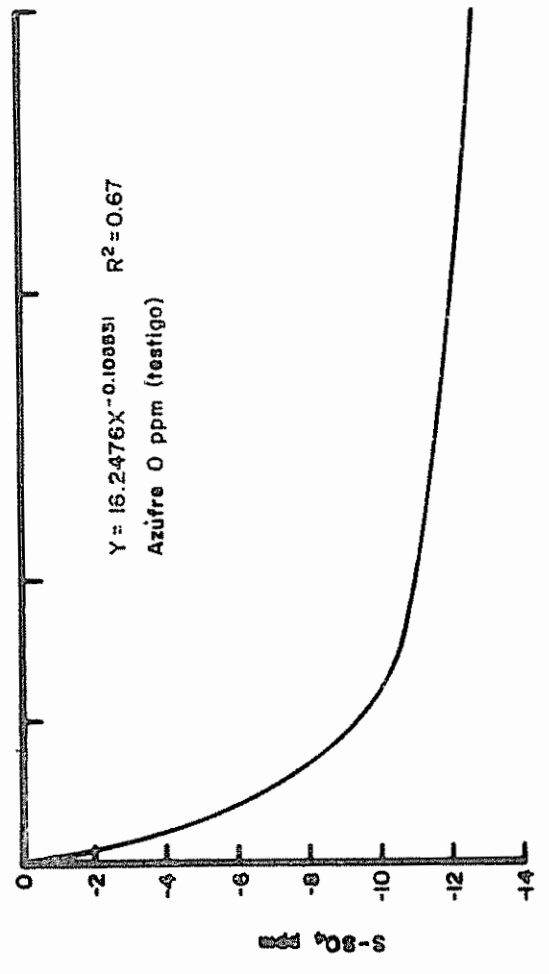
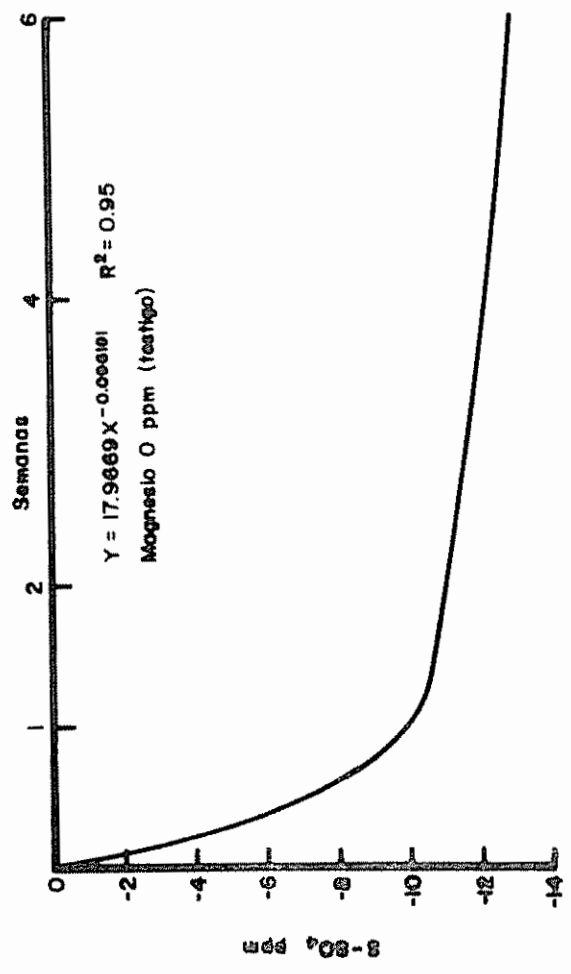
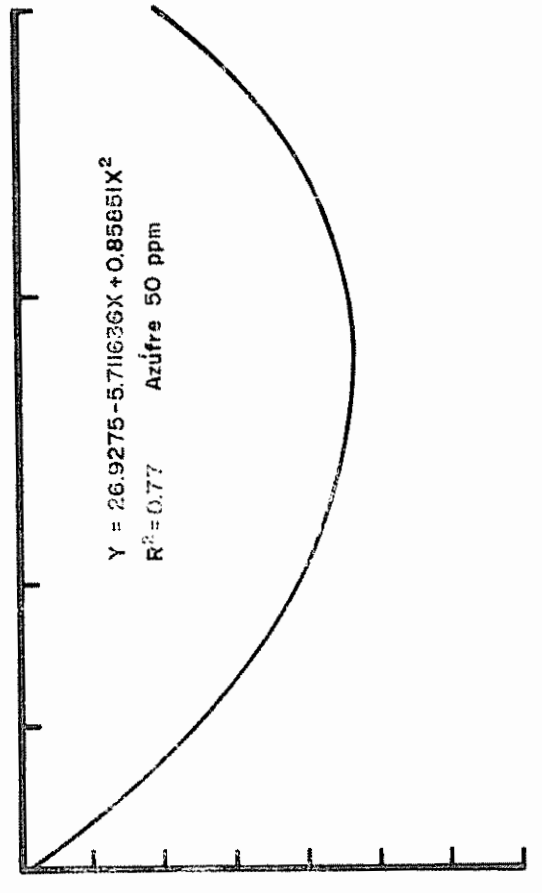
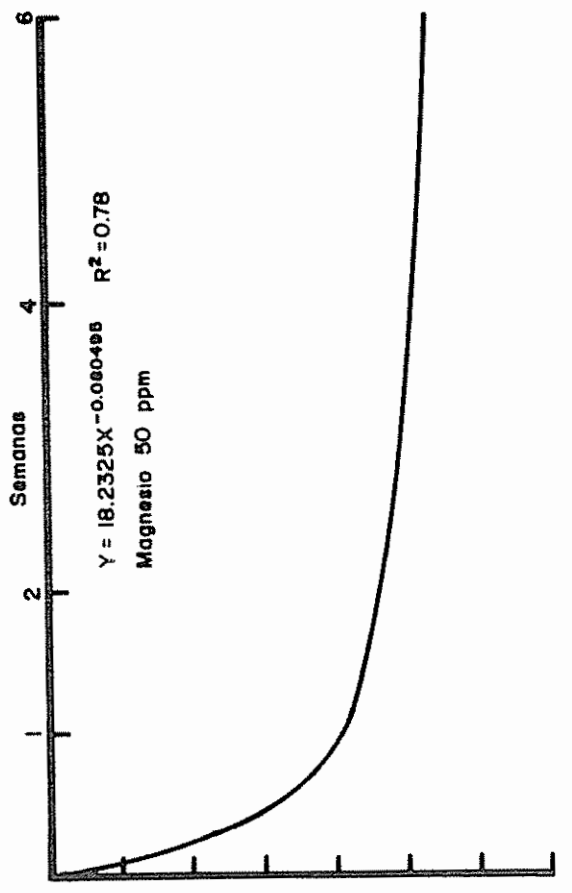


Fig. 13 Cambio en la concentración de S-SO₄ en el suelo La Mora por efecto de la adición de magnesio y azúfre (O: valor original, +: mineralización, -: inmovilización)

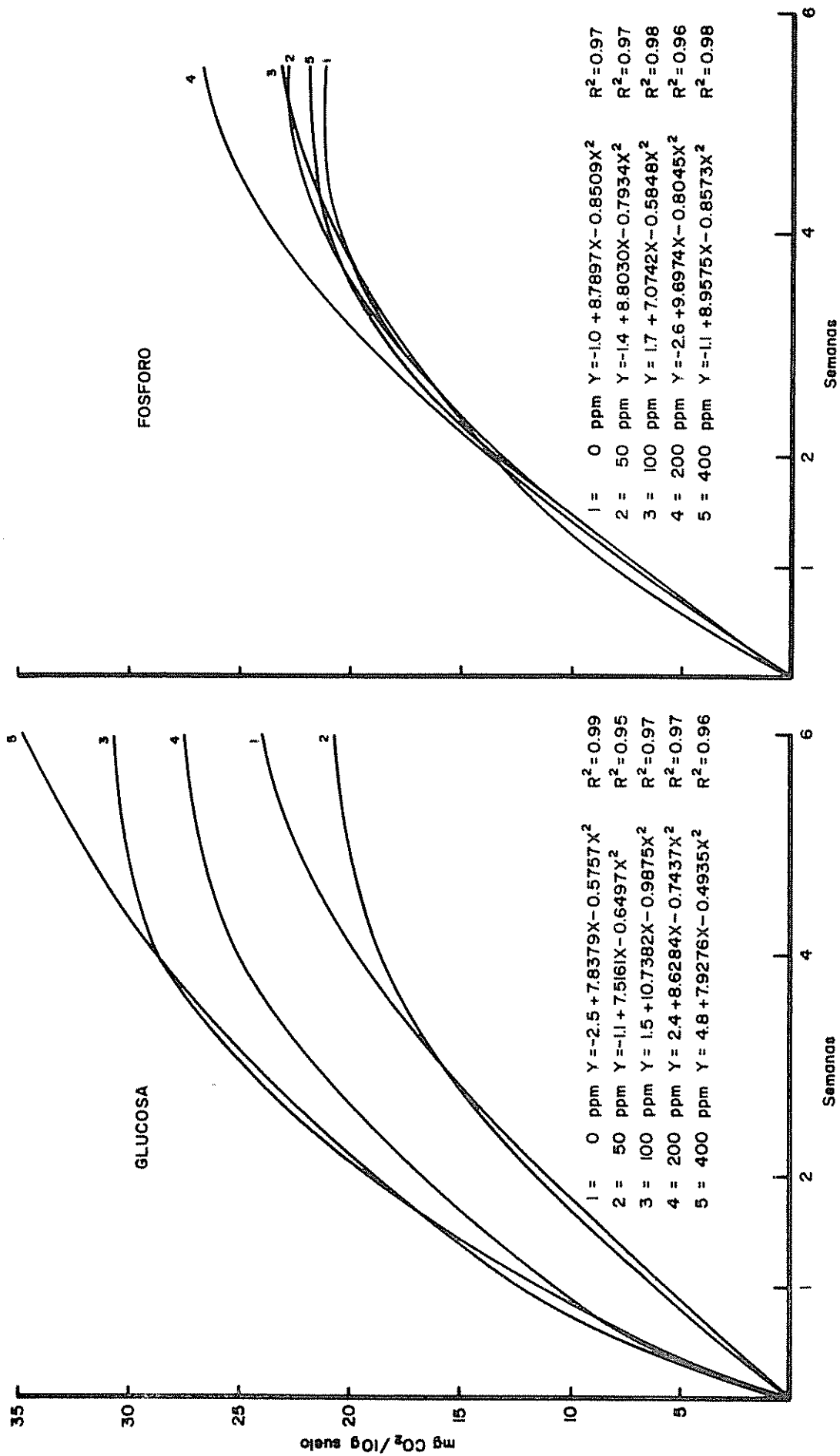


Fig. 14. Efecto de la adición de glucosa y fósforo en la producción de CO₂ en el suelo La Lapa para diferentes periodos de incubación.

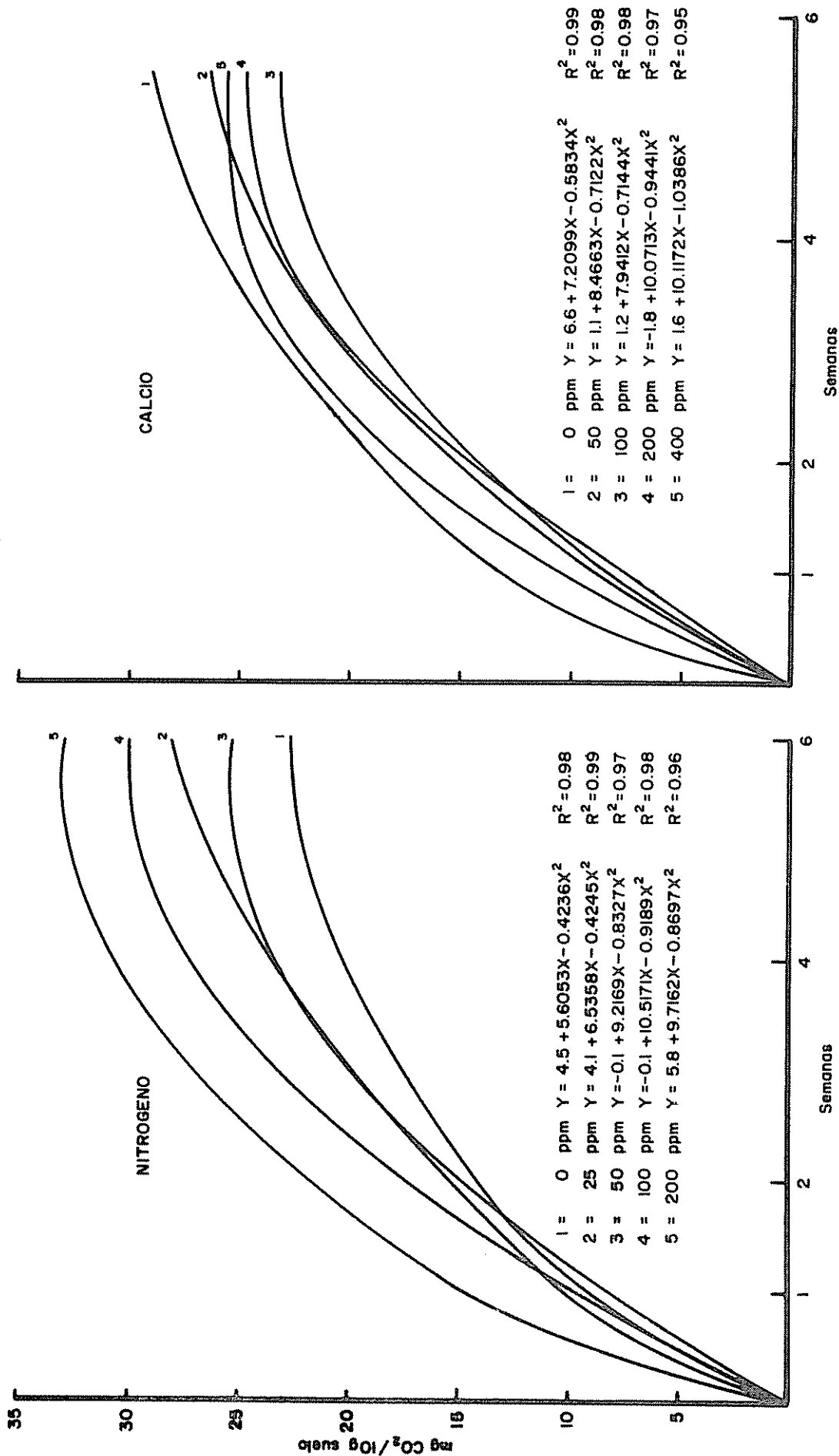


Fig. 15. Efecto de la adición de nitrógeno y calcio en la producción de CO₂ en el suelo La Lapa para diferentes periodos de incubación.

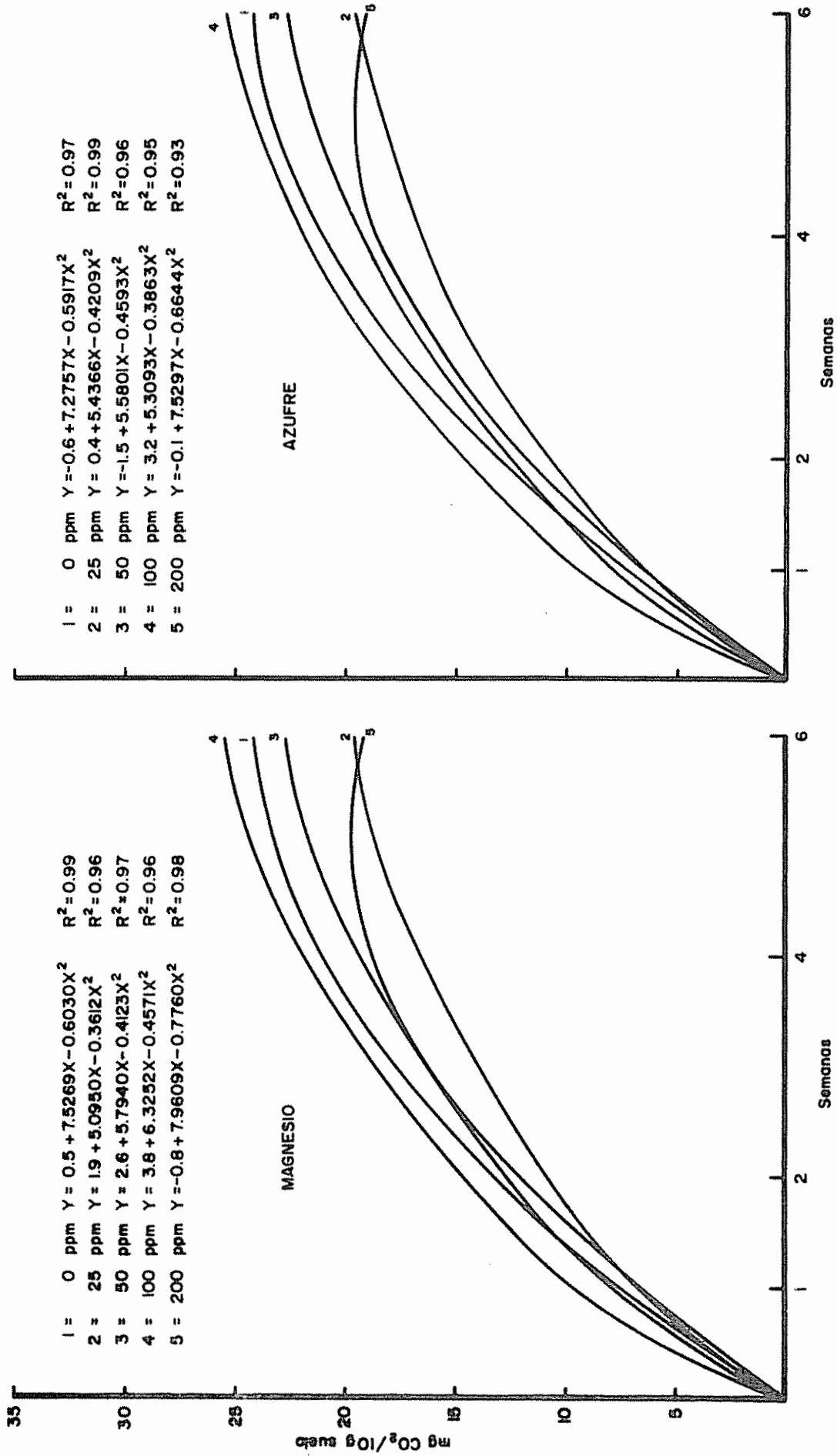


Fig. 16. Efecto de la adición de magnesio y azufre en la producción de CO₂ en el suelo La Lapa para diferentes periodos de incubación.

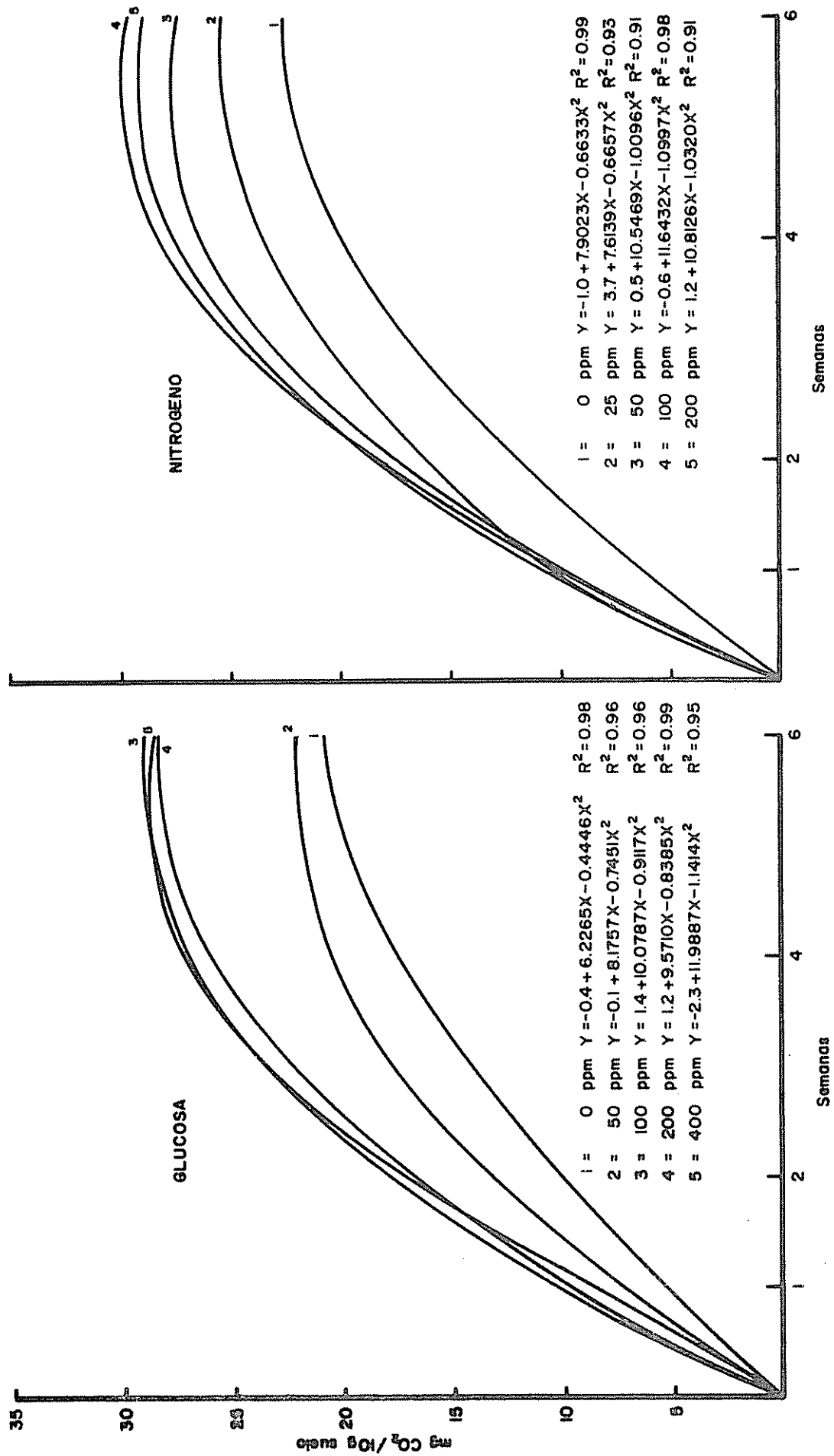


Fig. 17. Efecto de la adición de glucosa y nitrógeno en la producción de CO₂ en el suelo La Mora para diferentes periodos de incubación

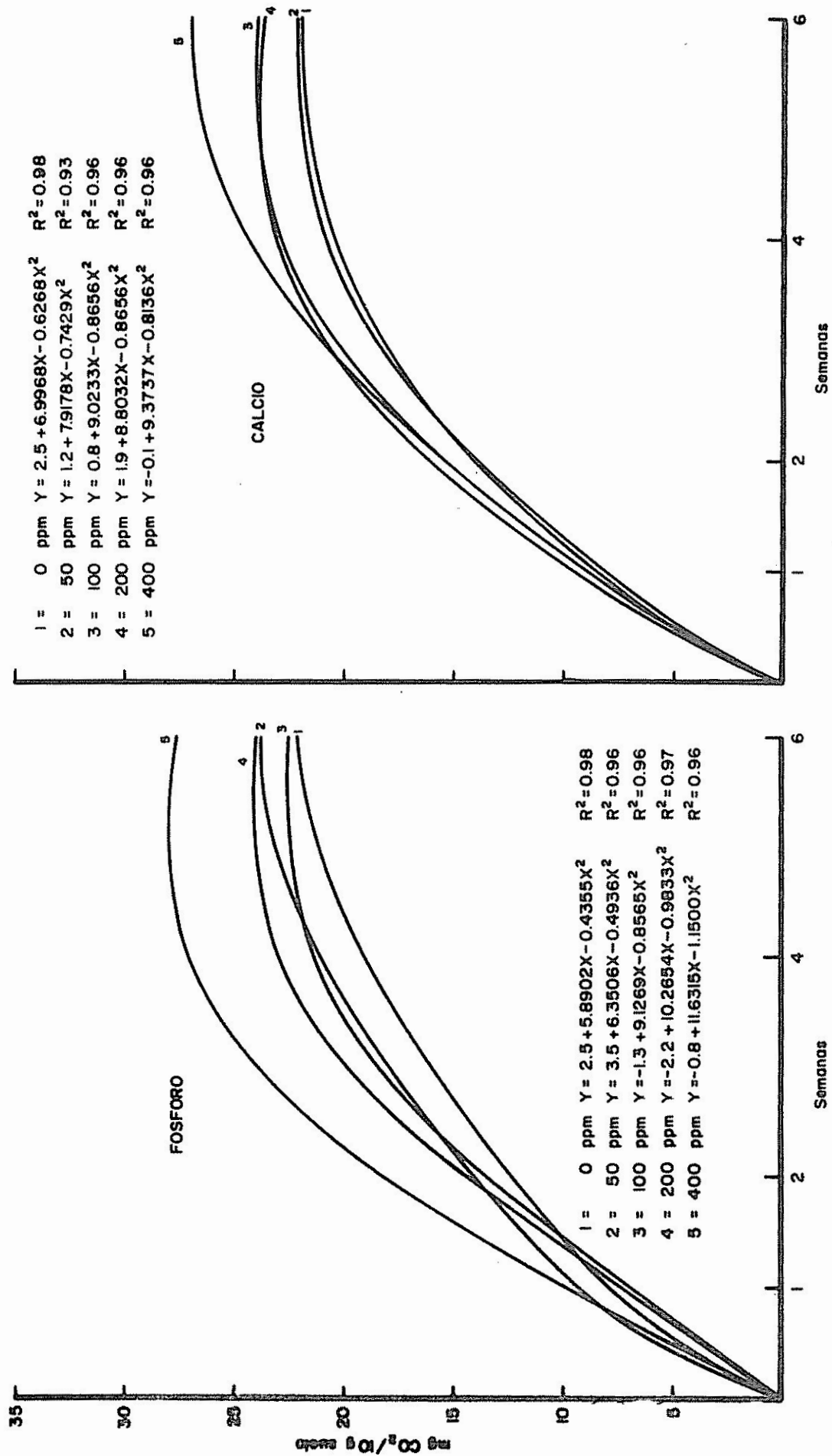


Fig. 10. Efecto de la adición de fósforo y calcio en la producción de CO₂ en el suelo La Mora para diferentes periodos de incubación.

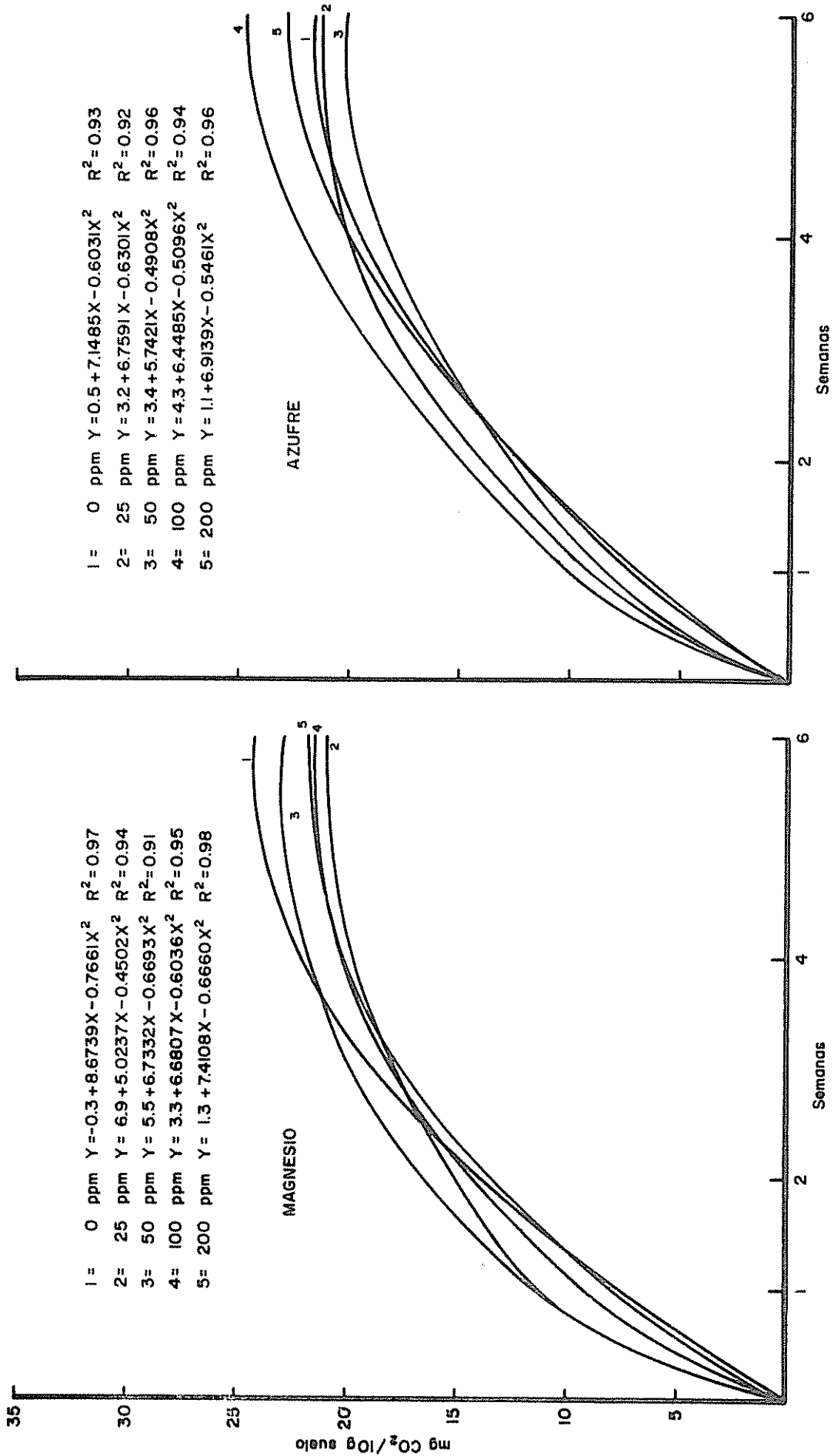


Fig. 19. Efecto de la adición de magnesio y azufre en la producción de CO₂ en el suelo La Mora para diferentes periodos de incubación.

inmovilización sería azufre > magnesio > fósforo y glucosa > nitrógeno > calcio. Para el suelo La Mora la situación sería azufre > magnesio, fósforo calcio, glucosa > nitrógeno.

Las ecuaciones de regresión de todos los niveles aplicados para estudiar la producción de sulfato aparecen en los cuadros 9 y 10 del Apéndice.

4.5.3. Metabolismo de los suelos expresado como producción de CO_2

La liberación de CO_2 expresada en mg/10 g de suelo, fue baja en las muestras estudiadas. Las producciones de CO_2 registradas en las cuatro lecturas realizadas Cuadros 11 y 12 del Apéndice y Figuras 14 a 19, están indicando que la actividad metabólica de los suelos La Lapa y La Mora alcanza los mayores valores entre la primera y segunda semana de incubación, tiene una disminución a la altura de la cuarta y cae fuertemente al completar las seis semanas.

El análisis de variancia de las tasas de producción de CO_2 mostró que hay un efecto significativo, de incremento, de los diferentes elementos suministrados al nivel del 5% en el suelo La Mora (Cuadro 13 del Apéndice) y ninguno en el suelo La Lapa. No obstante, los niveles de estos elementos no influyeron de manera significativa en los dos suelos considerados.

Las tasas medias de producción de CO_2 indican que en su orden, la glucosa y el fósforo influyen sobre el aumento de la actividad metabólica del suelo La Mora, mientras que el nitrógeno, calcio, magnesio y azufre no inciden sobre dicha producción. En el caso del suelo La Lapa, solo el nitrógeno muestra un ligero efecto sobre una mayor actividad metabólica, para los otros elementos su acción es nula.

5. DISCUSION

Es interesante hacer notar que la CIC es dependiente del porcentaje de arcilla. Fuentes (44) encontró que la CIC de suelos ácidos volcánicos es dependiente de la materia orgánica. Posiblemente al existir una menor cantidad de materiales orgánicos en los suelos estudiados, las arcillas muestran una mayor cantidad de cargas disponibles al no haber sido neutralizadas por radicales orgánicos. Por otra parte, el pH registrado en estos suelos comparado con otros obtenidos en áreas volcánicas (44, 32), permite pensar que a las arcillas alofánicas y a sus tradicionales derivados de metahalosita y halosita, se han sumado arcillas de tipo montmorillonítico, cuya génesis es propiciada en medios más básicos que el correspondiente a suelos volcánicos ideales (pH 5,5).

La diferenciación apreciada entre las concentraciones de arcilla (mayor en el litoral Pacífico) y de arena (mayor en las faldas volcánicas) parece confirmar que el desarrollo pedogenético de los suelos aumenta en la dirección de los volcanes El Chonco - San Cristobal → Océano Pacífico, tal como se desprende de las investigaciones realizadas por Marín (59). Una de las causas explicativas es que los materiales volcánicos finos eyectados son depositados a mayor distancia del cono que los más gruesos. Otra causa que puede señalarse es que los drenajes, tanto internos como externos, son más lentos en el litoral Pacífico. En todo caso son suelos jóvenes donde el análisis de sus datos no perfila ningún tipo de horizonte diagnóstico definido.

En general, el contenido de materia orgánica es bajo debido en parte a las elevadas temperaturas que favorecen la descarboxilación microbiana, y al sistema de cultivo en hileras que deja descubierto el suelo. Además el poco desarrollo de los suelos no favorece el acomplejamiento de la materia orgánica por la alófana a través de puentes con el aluminio como ocurre en otras áreas volcánicas (17).

Las concentraciones de S-total encontradas en los suelos del área norte del Pacífico de Nicaragua pueden calificarse como medianas siendo bastante similares a las reportadas por Domínguez y Rodríguez (32) para los suelos de Colombia y por Schalscha (74) para suelos de Chile. Son superadas por las concentraciones encontradas por Blasco (18) y Granados (46) en suelos de Costa Rica influenciados por el volcán Irazú. Otras investigaciones demuestran que el contenido de azufre total en suelos no volcánicos también supera la media obtenida para Nicaragua (84, 75, 61).

Los valores porcentuales de la fracción orgánica de azufre son bajos, y pueden considerarse similares a los de otras regiones con influencia de cenizas volcánicas (46, 32). A pesar de ser su concentración baja su importancia puede ser mucha como se ha demostrado en otros trabajos (78, 41, 10), especialmente por su transformación a sulfato vía del ataque microbial, o porque se ha comprobado que las plantas en ciertos casos pueden asimilar aminoácidos en pequeñas cantidades (84, 78, 42, 10). La escasa participación del S-orgánico dentro del S-total se comprobó al encontrarse un porcentaje muy bajo de asociación entre estas dos formas. Es posible que esto se deba al hecho de que la cantidad de materia orgánica de estos suelos, 2,9% como media, es baja. La circunstancia de que la

mayor concentración de S-orgánico no siempre se encuentre en la primera capa de los suelos, podría quizás ser el resultado de la fuerte actividad volcánica que ha caracterizado a esta región, que bien pudo haber enterrado materiales de vegetación ya establecida, sobre los cuales se depositaron nuevamente materiales de las eyectas volcánicas.

Al igual que lo encontrado en otras investigaciones sobre suelos volcánicos (32, 18) el presente estudio confirma que, al contrario de lo que ocurre en la mayoría de los suelos no volcánicos (84) donde el S-orgánico representa hasta un 80% del S-total, en suelos volcánicos de Latinoamérica el S-inorgánico es la fracción más importante para formar la cantidad de S-total. Vale decir que el azufre total de estos suelos es dependiente de la constitución química de las cenizas eyectadas. Dentro de la bioquímica de los suelos la presencia de mayores cantidades de azufre inorgánico tenderían a sugerir que las transformaciones quimioautotróficas deberían ser de más importancia que las heterotróficas.

Lo anterior podría, al menos en parte, explicar el hecho de que estos suelos presenten una mineralización débil ya que, en general (3) la población quimioautotrófica es superada por la heterotrófica en número y capacidad de acción metabólica. Por ende la mayor actividad quimioautotrófica de las bacterias que transforman el azufre se lleva a cabo en condiciones ácidas, aspecto que tampoco reúnen estos suelos.

Las cantidades de S-intercambiable presentes en estos suelos son bajas y se piensa que esto ocurra bien por una escasa actividad microbial como pudo evidenciarse a través de una prueba de incubación o por la

adsorción del sulfato por la fracción arcilla o la materia orgánica, según lo expuesto en varios trabajos (43, 27, 26, 25, 23). Esto también puede estar coadyuvado por la baja cantidad de azufre orgánico que se encontró.

El uso de los fosfatos para determinar los sulfatos se basa en el hecho de que el ión PO_4^{3-} desplaza fácilmente al ión SO_4^{2-} del complejo de intercambio (38). Concordando con los resultados obtenidos por Fox et al. (38) y Spencer y Freney (76), en estos suelos, cuando el anión PO_4^{3-} estuvo acompañado por el catión K extrajo ligeramente más azufre que cuando el cation acompañante fue Ca^{2+} . Esto posiblemente es atribuible a una más rápida disociación del compuesto $\text{PO}_4\text{H}_2\text{K}$. El análisis de los datos realizados señala que se pueden usar indistintamente ambos extractantes. De momento sería de tener en cuenta el concepto de Rehm y Caldwell (71), así como lo expresado por Fox et al.(38), quienes consideran que el fosfato de calcio estima satisfactoriamente el azufre aprovechable por las plantas, señalando que la solución de fosfato de calcio es un extractor más conveniente que el fosfato de potasio para suelos arenosos, que sería el caso de los suelos estudiados. Estos investigadores indican que la filtración del extracto es más rápida y los extractos turbios menos frecuentes cuando se usa fosfato de calcio.

Cuando el S-intercambiable fue extraído con CO_3Ca se determinaron las cantidades más altas en promedio. Sin embargo esta forma de extracción tiene menor importancia metodológica ya que este reactivo desarrolla turbidez que hace difícil precisar las lecturas, aún contándose con blancos adecuados. Por tanto no es aconsejable utilizarlo en este tipo de determinaciones.

El empleo del agua como extractante para determinar el azufre intercambiable de los suelos ha sido recomendado ampliamente en trabajos con suelos de la zona templada (28, 7). Sin embargo, Granados (46) demostró recientemente que el agua no era capaz de medir variaciones de las concentraciones de azufre en muestras de suelos incubados. En la presente investigación los resultados obtenidos con el uso de agua no mostraron relación con los obtenidos utilizando los otros extractantes. El agua demostró incrementar su capacidad de extracción a medida que aumentó el porcentaje de arcilla y por otra parte su comportamiento es errático en presencia de materia orgánica. Por tanto no parece ser un método muy apropiado para suelos de origen volcánico.

El azufre intercambiable disminuye a medida que los suelos se alejan geográficamente de los volcanes. Esto hace pensar que los materiales volcánicos gruesos son capaces de generar más SO_4^{2-} que las arcillas. Es decir, los suelos del litoral Pacífico requieren mayores aplicaciones de fertilizantes azufrados que los situados en las proximidades de los volcanes El Chonco y San Cristóbal. Cabe dentro de lo posible que parte del agotamiento de los suelos más próximos al Océano Pacífico se deba a un uso más intensivo y más antiguo en la agricultura.

Así mismo el azufre intercambiable aumenta con el contenido de la materia orgánica de los suelos. Sobre el particular se discutirá ampliamente al entrar a tratar el tema de mineralización.

No se aprecia en la región lixiviación de azufre intercambiable a través del perfil. Dada su relativamente baja concentración es posible que

las plantas traten de utilizarlo al máximo impidiendo su desplazamiento por la lluvia y los fertilizantes fosfatados.

Si bien no se precisan los rangos de azufre intercambiable y la respuesta de las plantas, Blasco (18) (11), considera que para los suelos volcánicos de Nariño, Colombia y utilizando PO_4^{3-} como anión desplazante, la escala se aproxima a las siguientes cifras: menos de 30 ppm de SO_4^{2-} : siempre hay respuesta a la aplicación de fertilizantes azufrados; entre 30 - 45 ppm de SO_4^{2-} : puede haber respuesta; más de 45-50 ppm de SO_4^{2-} : no hay respuesta a la aplicación de fertilizantes azufrados.

Existe bastante interdependencia entre el azufre intercambiable y el azufre reserva del suelo, debido a que esta última fracción depende del azufre orgánico cuya presencia aparece, en los suelos estudiados, en una asociación estrecha con el azufre intercambiable. Es decir, a pesar de ser el azufre orgánico cuantitativamente escaso, se confirma como la forma azufrada más importante de los suelos estudiados ya que de ella dependen tanto la reserva del suelo como buena parte del azufre intercambiable.

La transformación del azufre en la prueba de incubación, expresada como la mineralización de este elemento, no se llevó a cabo en los suelos representativos de las series La Lapa y La Mora con la adición de diferentes sales minerales y un compuesto orgánico. Desde luego hay que indicar que los resultados obtenidos en diversos trabajos sobre el particular han sido muy variables (83, 46, 39, 18, 9, 8). Por consiguiente se entra a

(11) Comunicación personal

considerar los factores que influyen en la mineralización del azufre, tratando de determinar su participación en el comportamiento observado.

La adsorción de sulfatos en el suelo aumenta a medida que el pH es más bajo, siendo casi nula en condiciones de neutralidad (52, 36). Los valores de pH 6,4 y 5,8 para el suelo La Lapa y La Mora respectivamente serían calificados con acidez débil y acidez media, en su orden (36). De esta manera la reacción del suelo podría estar indicando efecto de adsorción, sobre todo en base a las menores cantidades de sulfato determinadas en el suelo La Mora que tiene el pH más bajo.

Chao et al. (24) manifiestan que la materia orgánica aumenta la capacidad de adsorción de sulfatos por las cargas positivas originadas en sus propiedades anfotéricas. Para el caso presente el suelo La Lapa tiene un contenido muy bajo de materia orgánica (3,15%), en cambio en el suelo La Mora sube a un valor de 8,44%. Nuevamente esta circunstancia estaría confirmando que en el suelo La Mora el fenómeno de adsorción estaría afectando en parte la liberación de sulfato, porque en el caso contrario y según Llanos (57), el bajo contenido de materia orgánica puede ser una causa para que ocurra poca retención. Por otra parte, se ha sugerido que la mineralización del azufre dependerá de la naturaleza de la materia orgánica adicionada recientemente y, que bajo condiciones en las cuales ocurre deficiencia de azufre, esta materia orgánica tenderá a ser baja en este elemento (9). Por esto, los bajos contenidos porcentuales de azufre orgánico así como la cantidad baja de S-intercambiable, quizás estarían indicando que la materia orgánica de estos suelos sea pobre en azufre.

Mientras en la materia orgánica haya menos azufre que el requerido para la proliferación microbial, la inmovilización es dominante (3). Esta conversión de azufre dentro del protoplasma microbial, que conlleva una reducción antes de formar parte de los compuestos orgánicos, lo hace inaprovechable para el crecimiento de las plantas, considerando que ha sido inmovilizado. Los dos procesos, inmovilización y mineralización, ocurren simultáneamente, y durante la ruptura de los compuestos orgánicos parte del azufre es usado para la síntesis de nuevo material celular, y solo aquel que no es necesitado para biosíntesis pasa a forma orgánica (79, 77, 42). Además, muchos autores indican (83, 79, 16, 3) que la relación C:S da idea acerca del proceso que dominará, y establecen que si el valor excede 50:1, ocurrirá inmovilización microbial del azufre. Los suelos incubados La Lapa y La Mora tienen relaciones de 28:1 y 73:1 respectivamente, reafirmando así que el factor que estaría determinando la menor producción de sulfato en el suelo La Mora pudiera ser la inmovilización. Lo ocurrido en el suelo La Lapa probablemente signifique que aun con relaciones del orden 28:1 se presenta inmovilización, aunque en este suelo fue mayor la producción de sulfatos.

En conjunto la acción de los distintos elementos utilizados no contribuyó a mejorar la mineralización del azufre, o al menos no se detectó. Debe recordarse que los suelos volcánicos son altamente fijadores de SO_4^{2-} (57) y cabe la posibilidad de que conforme se mineralice el azufre pase a formas más complejas con la alófana no desplazables con el uso de los fosfatos. Una interpretación práctica sería que el uso individual de esos elementos no mejora el azufre disponible del suelo, previéndose para futuros

trabajos o bien el uso de combinaciones de elementos o el empleo de más dosis de azufre para complementar, tentativamente, la escala señalada previamente. Como los agricultores parecen emplear fertilizantes compuestos (11) se requeriría adicionar en la fórmula más azufre.

En razón de que la degradación del carbono orgánico es una propiedad de todos los organismos heterótrofos, comúnmente es utilizada como un indicador del nivel de actividad microbial (3). Advirtiendo que la tasa de producción de CO_2 en el suelo no depende únicamente de la densidad de la microflora, sino también y principalmente de su actividad la cual a su vez depende de las condiciones del suelo (33). Por otra parte se ha encontrado que la mineralización del carbono aumenta después de que el suelo se seca y de nuevo se humedece (1). De esta manera pudiera decirse que, el potencial bioquímico de los suelos estudiados es bajo en comparación con los datos obtenidos por Granados y Blasco (45) en suelos cacaoteros de Costa Rica, y por Alcoforado (2) en suelos de Esparta (Costa Rica), especialmente en el suelo La Mora.

La mayor cantidad de materia orgánica del suelo La Mora 8,44%, con respecto al suelo La Lapa 3,15%, no llegó a determinar una más alta actividad metabólica en el primero de estos suelos, porque la producción acumulada final de CO_2 en ambos, aproximadamente fue la misma. En parte significaría que la presencia de ácidos fúlvicos es mayor en el suelo de La

(11) Comunicación personal

Lapa que en el de La Mora, ya que según Haussman (47), esta fracción es una de las que genera más CO_2 . Así mismo la descarboxilación de la materia orgánica de La Lapa es mucho más elevada que la del suelo La Mora. Es decir la materia orgánica de este último suelo es más resistente (más lignificada). La más alta actividad microbial registrada durante las dos primeras semanas de incubación, probablemente está ligada a la acción secamiento-rehumedecimiento, porque luego de secar al aire las muestras, al momento de iniciar la incubación tienen que ser llevadas a capacidad de campo.

En general, se sabe que en las transformaciones de la materia orgánica los componentes hidrosolubles desaparecen pronto, seguidos por las fracciones solubles en alcohol y éter, y después, por las fracciones hemicelulosa, celulosa y lignina (20). Esta secuencia en la descomposición de la materia orgánica también podría explicar la actividad microbial decreciente luego de las dos semanas de incubación, ya que así los microorganismos van encontrando materiales progresivamente más difíciles de descomponer, que disminuye su efectividad.

El efecto significativo de los tratamientos glucosa y fósforo sobre la producción de CO_2 en el suelo La Mora, quizás esté indicando la acción de éstos como fuente de energía, ayudando así a una mayor actividad metabólica. Un aspecto que debe tenerse en cuenta es que el punto cuatro semanas dentro del período de incubación está indicando una fuerte caída de la producción de CO_2 en los dos suelos y a la vez, en varios casos, una mejora sensible en la producción de sulfatos. Esto podría indicar que, a partir de la cuarta semana disminuye la asimilación microbial del sulfato que se estuviera produciendo.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Se considera que el nivel del azufre disponible para las plantas es muy crítico en la región estudiada. Es necesario para una buena producción complementar la fertilización con compuestos azufrados.
2. A falta de pruebas de campo y de invernadero, y teniendo en cuenta trabajos realizados en otras áreas volcánicas, se recomendaría adicionar azufre hasta subir el nivel de S-intercambiable del suelo a 50 ppm.
3. Tomando como referencia los pesos de la capa arable de los suelos estudiados (mínimo 1.290.000 kg, máximo 1.650.000 kg), tentativamente se recomendaría aplicar las siguientes kg de S por hectárea y series:

Telica	70	Chichigalpa II	50
La Lapa I	60	Chinandega I	35
La Lapa II	60	La Mora I	35
La Mora II	55	Chichigalpa	30
Chinandega II	55		

Todas estas cantidades deberían ir adicionadas en un 20% para prevenir pérdida de lixiviación y fijación. Estas recomendaciones son con base en el método del fosfato de calcio.

4. Para la estimación del azufre intercambiable en estos suelos se recomienda utilizar como extractor el anión PO_4^{3-} . No aparecen como recomendables el uso del agua y del CO_3Ca .

5. El azufre inorgánico conforma aproximadamente el 80% del azufre total de la región del Pacífico de Nicaragua. La correlación de la fracción inorgánica con el azufre total es de $r = 0,92$.
6. No obstante su poca significación cuantitativa, el azufre orgánico es, agrícolamente, mucho más importante que el inorgánico, ya que el estudio demostró que el S-intercambiable y el S-reserva del suelo dependen de los compuestos orgánicos azufrados.
7. En los dos suelos incubados, dentro de la posibilidad mineralización o inmovilización, predominó ampliamente este último proceso. Se detectó efecto significativo de los tratamientos no así de los niveles.
8. La más alta actividad microbial se registró durante las dos primeras semanas. Sin embargo, las bajas cantidades de CO_2 liberadas en general durante todo el período de incubación indican que, el potencial bioquímico de los suelos La Lapa y La Mora es bajo.
9. Se encontró que en general la cuarta semana es un punto crítico en el proceso de incubación, a partir del cual cae fuertemente la liberación de CO_2 y se registra un incremento en la producción de SO_4^{2-} .
10. Con base en el punto anterior se puede asumir que los fertilizantes provocarían la inmovilización del S- SO_4 intercambiable de los suelos en el primer mes de su aplicación, mientras que a partir de este período existiría la posibilidad de que mejoren la disponibilidad del azufre.

7. RESUMEN

El presente estudio se realizó en suelos representativos de una región volcánica del Pacífico en Nicaragua. El área en estudio cubre una franja de 60 a 80 Km de ancho aproximadamente, de N.O. a S.E. paralela a la costa del Pacífico entre los 11° y 13° latitud Norte y $85^{\circ} 30'$ y $87^{\circ} 45'$ longitud Oeste. Según el Sistema Holdridge, el área pertenece a las formaciones Bosque Tropical Muy Seco y Bosque Tropical Seco.

En muestras seleccionadas de cinco series se determinaron las fracciones de azufre total, orgánico, inorgánico, intercambiable, soluble en agua y reserva del suelo. El metabolismo y mineralización de azufre fueron estudiados en muestras de dos series extremas en su localización, La Lapa (Litoral Pacífico) y La Mora (volcanes El Chonco - San Cristóbal) tratando los suelos con cinco niveles de N, P, Ca, Mg, S y glucosa. Además se determinaron otras características de los suelos en función de distancia a los volcanes antes indicados y a la profundidad en el perfil.

Los resultados muestran que:

1. El nivel de azufre disponible en el suelo parece ser muy crítico para las plantas (7 a 10 ppm), por lo que se recomienda la aplicación de fertilizantes azufrados para elevar ese nivel hasta 50 ppm.
2. El azufre intercambiable debe ser extraído con el anión PO_4^{3-} .
3. La fracción azufre inorgánico constituye aproximadamente el 80% del total. Sin embargo el S-orgánico parece ser más importante, puesto que según el presente estudio, tanto el S-intercambiable como el

S-reserva del suelo dependen de los compuestos orgánicos azufrados.

4. En los suelos incubados, predominó el proceso de inmovilización sobre el de mineralización.

7a. SUMMARY

Present investigation was carried out in selected soils from a volcanic area of the Pacific Region in Nicaragua, located in an area of 60 to 80 Km wide in a N.W. to S.E. direction between 11° and 13° N; $85^{\circ} 30'$ and $87^{\circ} 45'$ W. According to Holdridge system, the area belongs to the very dry and dry tropical forest formations.

In selected soil samples from five soil series, sulphur was determined in its total, organic, inorganic, exchangeable, water soluble and soil reserve forms. Only two soil series, namely, La Lapa (Pacific coast) and La Mora (El Chonco - San Cristobal volcanoes) were selected to conduct sulphur metabolism and mineralization studies as affected by N, P, Ca, Mg, S and glucose additions. The various treatments were applied at five levels. Other soil characteristics were also studied in relation to distance to the above mentioned volcanoes and to soil depth.

Results have shown that:

1. The level of available sulphur appears to be very critical for plant nutrition (7 to 10 ppm), therefore fertilizers should be applied in order to raise soil sulphur concentration to 50 ppm.
2. The exchangeable soil sulphur should be extracted by PO_4^{3-} anion.
3. The inorganic form of sulphur approximately represents 80% of the total fraction; however the organic form appears to be more important since the exchangeable and soil reserve forms depend on sulphur organic compounds.
4. In both soil series studied, sulphur immobilization was prevalent over sulphur mineralization.

3. LITERATURA CITADA

1. AGARWAL, A. S., SINGH, B. R. y KANEHIRO, Y. Soil nitrogen and carbon mineralization as affected by drying-rewetting cycles. Soil Science Society of America Proceedings 35:96-100. 1971.
2. ALCOFORADO, C. B. Mineralizacáo de fosforo em solos do Pacifico de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1972. 64 p.
3. ALEXANDER, M. Introduction to soil microbiology. New York, Wiley, 1964. 472 p.
4. ALLAWAY, W. H. y THOMPSON, J. F. Sulfur in the nutrition of plants and animals. Soil Science 101:240-247. 1966.
5. ARNUADI, C. y CRAVERI, R. Metabolismo dello zolfo nel terreno. Agrochimica 8:285-302. 1964.
6. BAEYENS, J. Nutrición de las plantas de cultivo. Trad. por J. M. Mateo. Madrid, Lemos, 1970. 614 p.
7. BARLETT, F. D. y NELLER, J. R. Turbidimetric determination of sulfate sulfur in soil extracts. Soil Science 90:201-204. 1960.
8. BARROW, N. J. Studies of mineralization of sulphur from soil organic matter. Australian Journal of Agricultural Research 12:306-319. 1962.
9. _____. Studies on extraction and on availability to plants of adsorbed plus: soluble sulfate. Soil Science 104:342-349. 1967.
10. BARDSLEY, C. E. y LANCASTER, J. D. Determination of reserve sulfur and soluble sulfates in soils. Soil Science Society of America Proceedings 24:265-268. 1960
11. _____ y LANCASTER, J. D. Sulfur. In Black, C. A., ed. Methods of soil analysis. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy, 1965. pp. 1102-1116.
12. BEATON, J. D. y BURNS, G. R. Determination of sulphur in soils and plant material. Washington. Sulphur Institute. Technical Bulletin no. 14. 1968. 56 p.
13. BIXBY, D. W y RUCKER, D. L. Adding plant nutrient sulphur to fluid fertilizers. Washington. Sulphur Institute. Technical Bulletin no. 11. 1965. 16 p.

14. BLAKE, G. R. Bulk density. In Black, C. A., ed. Methods of soil analysis. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy 1965. pp. 374-390.
15. _____. Particle density. In Black, C. A., ed. Methods of soil analysis. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy, 1965. pp. 371-373.
16. BLASCO, M. Microbiología de suelos. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1970. 247 p.
17. _____. Efecto de la humedad sobre la mineralización del carbono en suelos volcánicos de Costa Rica. Turrialba 21:7-12. 1972.
18. _____. Contenido y metabolismo del azufre en suelos volcánicos de Centro América. In Panel sobre Suelos Volcánicos de América 2, Pasto, Colombia, 1972. (en prensa).
19. BURGESS, A. Introducción a la microbiología del suelo. Trad. del inglés Andrés Suárez. Zaragoza, Acribia, 1960. 199 p.
20. _____. La descomposición de la materia orgánica del suelo. In _____ y Raw, F., eds. Trad. del inglés José L. Mensua y Xavier Llimona. Barcelona, Omega, 1971. pp. 557-573.
21. COLEMAN, R. The importance of sulfur as a plant nutrient in world crop production. Soil Science 101:230-239. 1966.
22. CORNFIELD, A. H. A simple technique for determining mineralization of carbon during incubation of soils treated with organic materials. Plant and Soil 14:90-93. 1961.
23. CHANG, M. L. y THOMAS, G. W. A suggested mechanism for sulfate adsorption by soils. Soil Science Society of America Proceedings 27:281-283. 1963.
24. CHAO, T. T., HARWARD, M. E. y FANG, S. C. Soil constituents and properties in the adsorption of sulfate ions: Soil Science 94:276-276-283. 1962.
25. _____, HARWARD, M. E. y FANG, S. C. Cationic effects on sulfate adsorption by soils. Soil Science Society of America Proceedings 27:35-38. 1963.
26. _____, HARWARD, M. E. y FANG, S. C. Iron or aluminium coatings in relation to sulfate adsorption characteristics of soils. Soil Science Society of America Proceedings 28:632-635. 1964.

27. CHAO, T. T., HARWARD, M. E. y FANG, S. C. Exchange reactions between hidroxyl and sulfate ions in soils. *Soil Science* 99:104-108. 1965.
28. CHAUDRY, I. A. Studies on sulphur metabolism in soils. Thesis Ph.D. London, University of London, 1966. 186 p.
29. CHILE. MINISTERIO DE AGRICULTURA . PROYECTO DE ESTUDIOS Y RECONOCIMIENTO DE SUELOS CHILENOS. Estudios sobre actividad de las poblaciones microbianas en suelos chilenos. Santiago, 1971. 94 p.
30. DAY, R. P. Particle fractionation and particle size analysis. In Black, C. A., ed. *Methods of soil analysis*. Madison, Wisconsin American Society of Agronomy, 1968. pp. 545-567.
31. DEVLIM, R. M. Fisiología vegetal. Trad. del inglés por Xavier Llimona. Barcelona, Omega, 1970. 614 p.
32. DOMINGUEZ, G. y RODRIGUEZ, C. H. Estudio sobre algunos aspectos de azufre en el altiplano de Pasto. Tesis Ing. Agr. Pasto, Colombia, Universidad de Nariño, 1971. 77 p.
33. D'YAKONOVA, K. V. Soil as a source of carbone dioxide for plants on irrigated and nonirrigated Ciscaucasian chernozems. In Kononova, M. M. *Microorganisms and organic matter of soils*. Trad. del ruso N. Kaner y S. Nemchonok. Jerusalem, Israel Program for Scientific Translations, 1970. pp. 122-189.
34. EKPETE, D. M. y CORNFIELD, A. H. Effect of varying static and changing moisture levels during incubation on the mineralization of carbon in soil. *Journal of Agricultural Science* 64:205-209. 1965.
35. ENSMINGER, L. E. Some factors affecting the adsorption of sulfate by Alabama soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 18:259-263. 1954.
36. FASSBENDER, H. W. Química de Suelos. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1969. 266 p.
37. FORSYTHE, W. Manual de laboratorio de física de suelos. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1972. 217 p.
38. FOX, R. L., OLSON, R. A. y RHOADES, H. F. Evaluating the sulfur status of soils by plant and soil tests. *Soil Science Society of America Proceedings* 28:243-246. 1964

39. FREDERICK, L. R. , STARKEY, R. L. y SEGAL, W. Descomposability of some organic sulfur compounds in soil. Soil Science Society of America Proceedings 21:287-292. 1957.
40. FRENEY, J. R. Some observations on the nature of organic sulphur compounds in soil. Australian Journal of Agricultural Research 12:424-432. 1961.
41. _____ y STEVENSON, F. J. Organic sulfur transformation in soil. Soil Science 101:307-316. 1966.
42. _____. Sulfur-containing organics. In McLaren, A. D. y Peterson G. H., eds. Soil biochemistry. New York, Decker, 1967. pp. 229-259.
43. FRIED, M. y BROESHART, H. The soil-plant system. 2 ed. New York, Academic Press, 1967. 358 p.
44. FUENTES, R. Comportamiento de la capacidad de intercambio catiónico en algunos suelos ácidos de origen volcánico. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1971. 107 p.
45. GRANADOS, M. y BLASCO, M. Metabolismo en términos de CO₂ de los suelos cacaoteros de Turrialba, Costa Rica. Turrialba (Costa Rica) 22:415-419. 1972.
46. _____. Mineralización del azufre en suelos bajo cultivo de cacao (Theobroma cacao L.). Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1972. 57 p.
47. HAUSSMANN, G. Culture techniques from the standpoint of conservation and implementation of organic matter in the soil, in the light of modern research. In Semaine d'etude sur le theme matiere organique et fertilité du sol. Roma, Pontificiae Academiae Scientiarum Scripta Varia, 1968. pp. 415-449.
48. HOMES, M. V. Les interactions du soufre dans le sol et dans la plante. Agrochimica 8:303-319. 1964.
49. IVANOV, M. V. Microbiological processes in the formation of sulfur deposits. Trad. del ruso por S. Nemchonok. Jerusalem, Israel Program for Scientific Translations, 1968. 298 p.
50. JENSEN, J. Some investigations on plant uptake of sulfur. Soil Science 95:63-68. 1963.

51. JORDAN, H. V. y ENSMINGER, L. E. The role of sulfur in soil fertility. *Advances in Agronomy* 10:407-434. 1958.
52. KAMPATH, E. NELSON, E. y FITS, J. The effect of pH, sulfate and phosphate concentration on the adsorption of sulfate by soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 20:463-466. 1956.
53. KONONOVA, M. M. Soil organic matter. 2 ed. Trad. por T. Z. Nowakowski y A. C. Newman. Oxford, Pergamon Press, 1966. 544 p.
54. KUN, E. The metabolism of sulfur-containing compounds. *In* Greenberg, D. M., ed. *Metabolic pathway*. 2nd. ed. London, Academic Press, 1964. v.2, pp. 237-261.
55. LOWE, L. E. y DELONG, W. A. Aspects of the sulphur status of three Quebec soils. *Canadian Journal of Soil Science* 41:141-146. 1961.
56. _____. Sulphur fractions of selected Alberta soil profiles of the Chernozemic and Podzolic orders. *Canadian Journal of Soil Science* 45:297-303. 1965.
57. LLANOS, R. Estudios del movimiento, adsorción y desorción de sulfato en suelos tropicales, usando azufre radioactivo. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1966. 62 p.
58. McCLUNG, A. C., DE FREITAS, L. M. y LOTT, W. L. Analysis of several Brazilian soils in relation to plant response to sulfur. *Soil Science Society of America Proceedings* 23:221-224. 1959.
59. MARIN, E. Geología y características de los suelos derivados de cenizas volcánicas de la región Pacífica de Nicaragua. *In* Panel sobre Suelos Volcánicos de América. 2. Pasto, Colombia, junio 18-24. Trabajos. (en prensa).
60. MASSOUMI, A. y CORNFIELD, A. H. A rapid method for determining sulphate in water extracts soils. *Analyst* 88:321-322. 1963.
61. _____ y CORNFIELD, A. H. Total sulphur and water-soluble sulphate contents of soil and their relations with other soil properties. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 15:623-625. 1964.
62. MEYER, B., ANDERSON, D. y BOHNING, R. Introducción a la fisiología vegetal. Trad. por Luis Gilbert y Roberto Pitterberg. Buenos Aires, EUDEBA, 1966. 579 p.

63. MILLER, E. V. Fisiología vegetal. Trad. Francisco Latorre. México, D.F., UTEHA, 1967. 344 p.
64. MILLER, R. D. y JOHNSON, D. D. The effect of soil moisture tension on carbon dioxide evolution, nitrification, and nitrogen mineralization. Soil Science Society of America Proceedings 28:644-647. 1964.
65. NICARAGUA. CATASTRO E INVENTARIO DE RECURSOS NATURALES. Fotomapas de suelos y clasificación de la tierra. Managua, Instituto Geográfico Nacional, 1971. Escala 1:20.000.
66. _____. TAX IMPROVEMENT AND NATURAL RESOURCES INVENTORY PROJECT NICARAGUA. Soil survey of the Pacific Region of Nicaragua. Managua, 1971. v. 2, pp. II-293-II-668.
67. NOMMIK, H. A technique for determining mineralization of carbon in soils during incubation. Soil Science 112:131-136. 1971.
68. PECK JUNIOR, H. D. Comparative metabolism of inorganic sulfur compounds in microorganisms. Bacteriological Reviews 25: 67-94. 1961.
69. PEECH, M. Hydrogen-ion activity. In Black, C. A., ed. Methods of soil analysis. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy, 1965. pp. 914-926.
70. POSTGATE, J. R. Recent advances in the study of the sulfate-reducing bacteria. Bacteriological Reviews 29:425-441. 1965.
71. REHM, G. W. y CALDWELL, A. C. Sulfur supplying capacity of soils and the relationship to soil type. Soil Science 105:355-361. 1968.
72. RICHARDS, L. A. Methods of measuring soil moisture tension. Soil Science 68:95-112. 1949.
73. SAIZ DEL RIO, J. F. y BORNEMISZA, E. Análisis químico de suelos; métodos de laboratorio para diagnosis de fertilidad. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1961. 107 p.
74. SCHALSCHA, E. B., ESTRADA, C. y GALINDO, G. G. Sulfur status of some volcanic ash derived soils. Agrochimica 16:77-82. 1971-1972.
75. SIMON-SYLVESTRE, G. Observations sur le cycle annuel du soufre dans un sol sous climat modérément pluvieux. Agrochimica 12:60-68. 1967.

76. SPENCER, K. y FRENEY, J. R. A comparison of several procedures for estimating the sulphur status of soils. *Australian Journal of Agricultural Research* 2:948-959. 1960.
77. STAINER, R. Y., DOUDOROFF, M. y ADELBERG, E. A. The microbial world. 3 ed. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1970. 873 p.
78. STARKEY, R. L. Relations of microorganisms to transformations of sulfur in soils. *Soil Science* 70:55-65. 1950.
79. STEVENSON, I. L. Biochemistry of soil. In Bear, F. E., ed. *Chemistry of the soil*. 2nd. ed. New York, Reinold, 1964. pp. 242-291.
80. TISDALE, S. L. y NELSON, W. L. Fertilidad de los suelos y fertilizantes. Trad. por Jorge Balasch. Barcelona, Montaner y Simon, 1970. 760 p.
81. VISHNIAC, W. y SANTER, M. The thobacilli. *Bacteriological Riviews* 21:195-213. 1957.
82. WAKSMAN, S. A. Principles of soil microbiology. Baltimore, Williams & Wilkins, 1927. 897 p.
83. WHITE, J. G. Mineralization of nitrogen and sulphur in sulphur deficient soils. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 2:255-258. 1959.
84. WHITEHEAD, D. C. Soil and plant nutrition aspects of the sulphur cycle. *Soils and Fertilizers* 27:1-8. 1964.
85. WILLIAMS, C. H. Some factors affecting the mineralization of organic sulphur in soils. *Plant and Soil* 26:205-223. 1967.
86. WINOGRADSKY, S. *Microbiologie du sol*. Paris, Masson, 1949. 861 p.
87. YOUNG, L. y MAW, G. A. The metabolism of sulphur compounds. London, Methuen, 1958. 180 p.

A P E N D I C E

Cuadro 1. Características generales de los suelos estudiados

Serie	Profundidad cm	CIC meq/100 g	H ₂ O pH 1:1	C. orgánico %	N. orgánica %	Densidad aparente g/cc	Densidad particul. g/cc	Retención humedad 0,33 bars 15 %	Distribución partículas Arena Limo Arcilla %	Clase Textural		
LA LAPA I	0-14	26,42	6,45	1,83	3,15	0,95	2,58	37,50	39,73	37,62	23,65	Franco
	14-31	33,56	6,85	1,01	1,74		2,62		26,15	43,85	30,00	Fco. Arc.
	31-86	31,48	6,85	1,17	2,01		2,59		28,38	47,01	24,61	Franco
	86-122	29,12		0,74	1,27				34,90	35,50	29,60	Fco. Arc.
LA LAPA II	0-16	31,05	6,35	2,91	5,03	1,00	2,51	39,00	41,55	38,22	20,23	Franco
	16-31	31,92	6,55	2,18	3,75		2,55		35,27	41,00	23,73	Franco
	31-90	30,22	6,60	1,09	1,88		2,63		27,21	41,91	30,88	Fco. Arc.
	90-120	32,86	7,05	0,93	1,61		2,62		30,22	39,55	30,23	Fco. Arc.
CHINANDEGA I	0-55	28,47	7,20	2,60	4,49	0,86	2,57	37,00	46,45	39,56	14,99	Franco
	55-130	33,55	7,25	1,44	2,48		2,60		32,84	44,01	23,15	Franco
	130-150	32,78	7,40	1,24	2,14		2,61		39,79	46,31	13,90	Franco
	150-160	32,42	7,05	0,93	1,68		2,61		39,31	47,85	12,84	Franco
CHINANDEGA II	0-52	16,48	6,75	1,78	3,08	0,99	2,60	33,00	53,19	33,81	13,00	Fco. Arenoso
	52-127	21,75	6,95	1,28	2,21		2,64		37,44	31,92	10,64	Fco. Arenoso
	127-146	21,57	7,05	1,09	1,88		2,64		59,73	30,73	9,54	Fco. Arenoso
	146-157	22,56	6,75	0,04	0,07		2,66		61,56	32,03	6,44	Fco. Arenoso
LA MORA I	0-28	13,33	5,85	4,90	8,44	0,99	2,45	37,00	65,73	27,95	6,42	Fco. Arenoso
	28-74	12,62	6,55	1,79	3,08		2,55		84,61	22,00	13,19	Arenoso Fco.
	74-135	17,12	6,45	3,46	5,96		2,50		77,56	2,17	20,27	Arenoso Fco.
LA MORA II	0-30	12,44	5,95	2,06	3,55	1,04	2,63	24,00	72,45	24,37	3,18	Arenoso Fco.
	30-77	18,67	6,55	1,90	3,28		2,62		63,32	27,46	4,22	Fco. Arenoso
	77-128	21,85	6,70	1,01	1,74		2,64		68,08	27,66	4,26	Fco. Arenoso
CHICHIGALPA I	0-19	22,13	6,20	2,68	4,62	0,97	2,61	33,80	49,65	37,51	16,67	Franco
	19-44	23,83	6,35	1,83	3,15		2,66		59,30	34,62	15,73	Franco
	44-87	26,76	6,70	0,74	1,27		2,60		42,85	32,13	8,57	Fco. Arenoso
CHICHIGALPA II	0-22	27,76	6,40	3,11	5,36	0,87	2,54	43,50	41,85	41,93	16,12	Franco
	22-46	29,46	6,65	1,85	3,28		2,63		48,74	39,51	11,75	Franco
	46-90	34,87	6,75	1,83	3,15		2,52		29,16	42,06	28,78	Fco. Arc.
TELICA	0-18	16,26	6,35	1,67	2,88	1,10	2,65	26,00	58,22	32,30	9,38	Fco. Arenoso
	18-31	22,70	6,55	2,02	3,48		2,63		57,88	32,64	9,48	Fco. Arenoso
	31-84	22,36	6,65	0,78	1,34		2,71		64,20	29,48	6,32	Fco. Arenoso
CHINANDEGA INTERMEDIA	0-45	21,35	6,50	2,06	3,55							

Cuadro 2. Concentración de las diferentes formas de azufre y sus porcentajes referidos a la fracción total

Serie	Profundidad	S-total ppm	S-orgánico %	S-orgánico ppm	S-inorgánico %	S-intercambiable (PO ₄) ₂ H ₂ Ca ₂ H ₂ O ppm	S-intercambiable PO ₄ H ₂ K %	S-intercambiable CO ₃ Ca ppm	S-soluble H ₂ O %	S-reserva suelo ppm					
LA LAPA I	0-14	659,7	24,86	164,0	495,7	75,14	8,7	1,31	1,05	50,4	4,52	17,9	2,71	155,3	23,54
	14-31	634,8	14,92	94,7	540,1	85,08	3,8	0,59	2,52	19,8	3,11	13,2	2,07	90,9	14,32
	31-86	514,4	26,57	136,4	375,0	73,33	1,9	0,37	1,47	26,3	5,15	8,5	1,65	134,5	26,30
	86-122	557,4	17,39	97,0	460,7	82,61	3,8	0,69	1,38	9,6	1,72	16,4	2,94	95,2	15,71
LA LAPA II	0-16	1.250,2	16,66	208,3	1.041,9	83,34	10,1	0,81	1,34	27,3	2,18	10,1	0,81	138,2	15,85
	16-31	761,1	18,87	143,6	617,5	81,13	3,6	0,47	1,06	17,1	2,24	6,3	0,83	140,0	18,39
	31-90	727,7	12,71	92,3	635,2	87,29	3,7	0,51	0,88	12,9	1,77	10,6	1,45	98,8	12,20
	90-120	625,0	12,74	79,6	545,4	87,26	3,8	0,60	1,51	9,4	1,51	5,5	1,36	75,8	12,13
CHINANDEGA I	0-55	979,0	13,05	127,8	851,2	86,93	24,7	2,53	1,26	23,8	2,44	14,1	1,44	103,1	10,53
	55-130	567,7	19,09	107,6	460,1	81,91	3,6	0,64	1,29	22,7	4,03	9,1	1,61	98,0	17,45
	130-150	1.324,9	7,95	105,3	1.219,6	92,05	3,7	0,28	T	9,4	0,71	7,5	0,56	101,6	7,67
	150-160	541,1	37,66	203,5	337,6	62,39	3,7	0,68	0,68	3,7	0,68	7,2	1,33	199,8	36,92
CHINANDEGA II	0-52	642,9	27,74	177,4	477,4	74,26	12,3	1,91	1,91	7,9	1,23	8,8	1,36	153,2	23,83
	52-127	1.196,6	10,56	126,4	1.070,2	89,44	1,88	0,15	0,73	14,9	1,24	10,1	0,84	124,6	10,41
	127,46	763,8	18,38	140,4	623,4	81,62	1,7	0,23	1,31	12,2	1,59	8,7	1,14	138,7	18,16
	146-157	482,2	24,28	117,1	365,1	75,72	3,5	0,73	2,57	8,9	1,84	10,2	2,11	113,6	26,56
LA MORA I	0-28	1.143,1	25,30	289,2	853,9	74,70	27,5	2,41	3,34	7,0	0,62	8,8	0,78	261,7	22,89
	28-74	937,4	22,09	207,1	730,3	77,91	16,6	1,77	1,95	14,0	1,49	8,7	0,93	190,5	40,45
	74-135	909,1	41,27	375,2	533,9	58,73	7,5	0,83	3,72	13,2	1,45	10,8	1,19	367,7	40,45
	0-30	496,4	29,45	146,2	350,2	70,55	14,4	2,90	0,46	1,37	14,4	6,8	1,37	131,8	26,55
LA MORA II	30-77	937,5	19,88	187,5	750,0	81,12	7,9	0,84	0,74	3,5	0,37	8,7	0,93	199,2	21,25
	77-128	662,9	22,49	149,1	513,8	77,51	7,1	1,07	1,07	8,8	1,33	3,5	0,53	142,0	21,42
	0-19	798,6	29,56	235,4	559,2	70,92	31,2	3,91	3,37	37,3	4,67	6,9	0,87	208,2	26,07
	19-44	893,0	19,88	177,5	715,5	80,12	3,5	0,40	0,89	7,9	0,89	7,9	0,88	174,0	19,49
CHICHIGALPA I	44-90	571,6	20,61	117,8	453,8	79,59	1,8	0,31	0,62	10,7	1,87	6,2	1,09	116,0	20,29
	0-22	1.196,7	36,37	435,2	761,5	63,63	12,3	1,02	1,02	14,9	1,24	1,24	0,58	422,9	35,34
	22-49	1.071,6	23,52	252,0	819,6	76,18	6,2	0,56	T	8,0	0,74	8,8	0,82	245,8	22,94
	49-90	761,1	51,41	391,3	369,8	48,59	3,6	0,57	0,47	14,3	1,88	12,5	1,65	387,7	50,94
TELICA	0-18	770,4	22,51	173,4	597,0	77,49	7,6	0,99	1,26	17,8	2,31	6,8	0,88	155,8	31,52
	18-31	589,4	35,14	207,1	382,3	64,36	7,2	1,34	1,19	14,9	2,52	7,0	1,19	199,2	33,80
	31-84	572,9	33,69	193,0	379,9	66,31	3,6	0,52	T	15,1	2,64	8,0	1,39	189,4	33,06
	0-45	642,6	23,08	148,3	494,3	76,92	8,6	1,34	1,07	12,1	1,88	9,9	1,54	139,7	21,74
CHINANDEGA INTERMEDIA															
CENIZA CERRO NEGRO															
		863,2	4,61	39,8	823,4	95,39	3,3	0,3	1,34	8,3	0,96	8,3	0,96	36,5	4,23

Cuadro 4. Matriz de correlación generada en el análisis de superficie de respuesta para los distintos suelos estudiados.

X_1							
X_2	0.78						
X_3	0.99	0.76					
X_4	-0.58	-0.68	-0.55				
X_5	-0.65	-0.57	-0.64	0.38			
X_6	0.65	0.57	-0.63	-0.34	-0.83		
X_7	-0.58	-0.62	-0.55	0.54	0.80	-0.88	
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	

X_1 = S-orgánico

X_2 = S-intercambiable PO_4H_2K

X_3 = S-reserva del suelo

X_4 = pH

X_5 = Arcilla

X_6 = Arena

X_7 = CIC

Cuadro 5. Cambios en la concentración de S-disponible durante la incubación del suelo La Lapa por un lapso de 6 semanas a la temperatura de 28-30°C y 0,33 bares de tensión

Tratamiento	ppm	1 semana	2 semanas	4 semanas	6 semanas
Glucosa	0	6,08	4,13	3,25	4,56
	50	7,38	3,47	3,69	3,47
	100	7,16	3,91	2,39	3,45
	200	6,51	6,73	3,47	4,56
	400	6,08	4,13	2,39	5,65
Nitrógeno	0	6,08	3,91	3,47	5,86
	25	6,08	4,34	2,39	6,08
	50	5,65	4,78	3,04	2,83
	100	4,78	3,04	2,61	3,69
	200	4,34	3,91	2,61	3,91
Fósforo	0	4,13	3,25	4,34	4,34
	50	3,47	4,56	4,34	2,61
	100	3,25	4,34	3,91	2,83
	200	3,47	3,91	5,21	9,33
	400	4,78	4,34	3,91	2,61
Calcio	0	3,91	3,91	2,61	3,91
	50	2,82	3,47	4,99	3,04
	100	3,69	3,91	2,61	3,69
	200	3,97	4,99	1,74	3,91
	400	3,91	3,47	4,78	4,56
Magnesio	0	4,78	4,78	4,34	3,47
	25	3,91	4,56	4,12	4,34
	50	3,69	4,78	6,76	3,26
	100	2,17	4,78	7,16	4,34
	200	1,74	5,21	6,50	3,91
Azufre	0	2,61	5,65	3,04	6,51
	25	3,47	6,08	4,12	7,82
	50	9,11	9,98	9,11	11,29
	100	18,66	20,40	17,36	17,36
	200	42,75	37,97	53,16	28,21

Cuadro 6. Cambios en la concentración de S-disponible durante la incubación del suelo La Mora por un lapso de 6 semanas a la temperatura de 28-30°C y 0,33 bares de tensión.

Tratamiento	ppm	1 semana	2 semanas	4 semanas	6 semanas
Glucosa	0	21,06	16,80	16,80	16,13
	50	23,29	17,02	15,90	15,45
	100	19,93	17,92	16,57	17,02
	200	21,06	19,04	16,35	16,80
	400	21,06	18,14	18,59	16,12
Nitrógeno	0	20,83	15,90	13,44	17,92
	25	21,28	15,45	16,13	15,45
	50	18,37	15,45	14,78	15,45
	100	4,03	16,13	17,02	14,33
	200	16,13	17,02	13,21	15,90
Fósforo	0	19,04	16,13	15,75	17,69
	50	22,17	15,90	18,59	14,33
	100	18,14	16,80	17,02	15,45
	200	16,57	19,26	19,26	15,01
	400	19,49	16,80	15,23	19,49
Calcio	0	19,04	15,23	17,02	17,69
	50	16,13	14,33	18,59	15,23
	100	17,92	17,02	14,33	16,57
	200	17,69	16,13	14,78	16,80
	400	18,59	15,45	15,45	16,80
Magnesio	0	18,59	17,69	17,02	14,33
	25	15,46	16,13	16,57	17,02
	50	15,23	18,14	16,80	16,80
	100	14,33	16,13	18,37	16,13
	200	14,33	15,90	17,02	17,69
Azufre	0	13,44	17,47	11,87	16,12
	25	15,46	19,04	15,45	18,36
	50	19,94	21,05	17,02	23,74
	100	30,02	28,22	26,43	24,19
	200	56,00	54,88	59,36	47,49

Cuadro 7. Tasas de producción de sulfatos y análisis de variancia para el suelo La Lapa.

	Niveles					Σ	\bar{x}
	1	2	3	4	5		
Glucosa	-0.12	-0.14	-0.16	-0.11	-0.13	-0.63	-0.13
Nitrógeno	-0.11	-0.12	-0.16	-0.17	-0.16	-0.74	-0.14
Fósforo	-0.13	-0.16	-0.16	-0.06	-0.17	-0.69	-0.13
Calcio	-0.16	-0.15	-0.16	-0.17	-0.11	-0.76	-0.15
Magnesio	-0.12	-0.11	-0.11	-0.08	-0.10	-0.54	-0.10
Azufre	-0.10	-0.06	0.02	0.12	0.24	0.22	0.04
<hr/>							
Fuentes de variación	G.L.	S.C.	C.M.	Fc			
Niveles	4	0.01787	0.00446	1.14495			
Fuentes	5	0.14391	0.02878	7.37531 **			
Error	20	0.07805	0.00390				
Total	29	0.23983					

** Significativo 1 %

Cuadro 8. Tasas de producción de sulfatos y análisis de variancia para el suelo La Mora.

	Niveles					Σ	\bar{x}
	1	2	3	4	5		
Glucosa	-0.08	-0.08	-0.07	-0.07	-0.07	-0.40	-0.08
Nitrógeno	-0.09	-0.09	-0.09	-0.10	-0.09	-0.48	-0.09
Fósforo	-0.08	-0.08	-0.08	-0.07	-0.07	-0.41	-0.08
Calcio	-0.08	-0.09	-0.09	-0.09	-0.08	-0.44	-0.08
Magnesio	-0.09	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.42	-0.08
Azufre	-0.10	-0.07	-0.04	-0.01	0.10	-0.13	-0.02

Fuentes de Variación	G.L.	S.C.	C.M.	Fc
Niveles	4	0.00542	0.00135	1.17975
Fuentes	5	0.01588	0.00317	2.76167 *
Error	20	0.02300	0.00115	
Total	29	0.04432		

* Significativo 5%

Cuadro 9. Ecuaciones de regresión obtenidas para la producción de sulfatos en el suelo La Lapa.

Tratamiento	ppm	Ecuación	R ²
Glucosa	0	$Y = 8.6318 - 2.883780 X + 0.36980 X^2$	0.96
	50	$Y = 8.8641 - 2.672642 X + 0.30105 X^2$	0.88
	100	$Y = 9.0883 - 3.087884 X + 0.35722 X^2$	0.93
	200	$Y = 8.7540 - 1.938712 X + 0.20039 X^2$	0.83
	400	$Y = 8.9239 - 3.501806 X + 0.48909 X^2$	0.95
Nitrógeno	0	$Y = 8.6977 - 3.159047 X + 0.44956 X^2$	0.86
	25	$Y = 8.9647 - 3.528910 X + 0.50302 X^2$	0.92
	50	$Y = 8.3859 - 2.365725 X + 0.24269 X^2$	0.91
	100	$Y = 8.2526 - 3.313323 X + 0.43250 X^2$	0.85
	200	$Y = 8.1353 - 3.075357 X + 0.39979 X^2$	0.86
Fósforo	0	$Y = 7.8075 - 2.836513 X + 0.38895 X^2$	0.76
	50	$Y = 7.4463 - 2.009619 X + 0.21286 X^2$	0.61
	100	$Y = 7.3873 - 2.121898 X + 0.24024 X^2$	0.55
	200	$Y = 7.7441 - 3.183555 X + 0.58442 X^2$	0.52
	400	$Y = 7.8748 - 2.079404 X + 0.21067 X^2$	0.66
Calcio	0	$Y = 7.9903 - 3.073728 X + 0.40460 X^2$	0.82
	50	$Y = 7.0067 - 1.985531 X + 0.24250 X^2$	0.36
	100	$Y = 7.8987 - 3.022387 X + 0.39329 X^2$	0.80
	200	$Y = 8.0504 - 3.083409 X + 0.39776 X^2$	0.72
	400	$Y = 7.5554 - 2.432243 X + 0.33817 X^2$	0.53

Cuadro 9. (Continuación)

Tratamiento	ppm	Ecuación	R ²
	0	$Y = 7.8600 - 1.948400 X + 0.21242 X^2$	0.77
	25	$Y = 4.7807 X - 0.118448$	0.79
Magnesio	50	$Y = 4.9782 X - 0.110227$	0.46
	100	$Y = 4.7710 X - 0.089502$	0.16
	200	$Y = 4.4878 X - 0.100766$	0.17
	0	$Y = 7.7086 - 2.897973 X + 0.45016 X^2$	0.51
	25	$Y = 7.8750 - 2.591101 X + 0.43026 X^2$	0.57
Azufre	50	$Y = 8.7456 + 0.342563 X$	0.52
	100	$Y = 10.9771 + 5.530973 X - 0.77831 X^2$	0.64
	200	$Y = 12.1229 + 24.061233 X - 3.55887 X^2$	0.82

Cuadro 10. Ecuaciones de regresión obtenidas para la producción de sulfatos en el suelo La Mora.

Tratamiento	ppm	Ecuación	R ²
Glucosa	0	Y = 18.9981 X - 0.084032	0.91
	50	Y = 19.0428 X - 0.089353	0.79
	100	Y = 19.1961 X - 0.079276	0.94
	200	Y = 19.5319 X - 0.078956	0.87
	400	Y = 19.6967 X - 0.076064	0.87
Nitrógeno	0	Y = 18.2412 X - 0.091262	0.72
	25	Y = 18.3880 X - 0.092068	0.85
	50	Y = 17.4943 X - 0.097950	0.88
	100	Y = 13.4827 X - 0.102275	0.13
	200	Y = 17.1205 X - 0.099930	0.87
Fósforo	0	Y = 18.5285 X - 0.083615	0.79
	50	Y = 18.7664 X - 0.088438	0.60
	100	Y = 18.3152 X - 0.078640	0.94
	200	Y = 18.8504 X - 0.077475	0.72
	400	Y = 18.9863 X - 0.080502	0.62
Calcio	0	Y = 18.6410 X - 0.080502	0.30
	50	Y = 17.5064 X - 0.090208	0.65
	100	Y = 17.9106 X - 0.092165	0.85
	200	Y = 17.8691 X - 0.090655	0.92
	400	Y = 18.0480 X - 0.089253	0.89

.....

Cuadro 10. (Continuación)

Tratamiento	ppm	Ecuación	R ²
	0	Y = 17.9669 X - 0.096191	0.95
	25	Y = 17.8209 X - 0.084541	0.76
Magnesio	50	Y = 18.2352 X - 0.080495	0.78
	100	Y = 17.7708 X - 0.082248	0.70
	200	Y = 17.7801 X - 0.080404	0.67
	0	Y = 16.2676 X - 0.105531	0.67
	25	Y = 25.2785 - 5.799635 X + 0.78728 X ²	0.62
Azufre	50	Y = 26.9275 - 5.711636 X + 0.85851 X ²	0.77
	100	Y = 28.2943 + 0.514621 X - 0.20705 X ²	0.61
	200	Y = 31.9293 + 17.952846 X - 2.59619 X ²	0.77

Cuadro 11. Producción de CO₂ en mg/10 g en el suelo La Lapa incubado por un período de 6 semanas a 28-30°C y 0,33 bares de tensión.

Tratamiento	ppm	1 semana	2 semanas	4 semanas	6 semanas	Total
Glucosa	0	4,18	7,70	7,04	5,06	23,98
	50	4,62	8,58	3,96	3,74	20,90
	100	10,34	10,56	6,60	3,30	30,80
	200	9,46	8,80	5,72	3,74	27,72
	400	11,00	10,12	5,94	5,06	32,12
Nitrógeno	0	9,24	5,72	4,62	3,52	23,10
	25	10,12	5,72	7,48	4,84	28,16
	50	7,48	9,02	5,94	3,08	25,52
	100	8,80	9,68	7,92	3,74	30,14
	200	11,36	10,12	5,72	3,74	33,22
Fósforo	0	6,16	8,36	5,06	1,76	21,34
	50	5,72	8,80	5,50	3,08	23,10
	100	7,70	6,82	5,50	3,30	23,32
	200	5,06	10,78	5,94	5,28	27,06
	400	6,38	8,14	5,72	1,76	22,00
Calcio	0	12,76	6,82	5,94	3,52	29,04
	50	8,14	8,58	5,94	3,96	26,62
	100	7,92	7,26	5,72	2,42	23,32
	200	6,38	9,68	6,16	2,64	24,86
	400	9,68	9,90	4,62	1,10	25,30
Magnesio	0	7,04	6,38	6,74	6,74	24,20
	25	5,94	6,16	3,52	4,18	19,80
	50	7,26	6,82	4,18	4,62	22,88
	100	8,80	7,70	4,18	5,06	25,74
	200	5,72	7,26	4,84	1,32	19,14
Azufre	0	5,28	7,70	5,06	3,96	22,00
	25	5,06	5,28	4,62	3,08	18,04
	50	2,86	6,16	3,52	3,08	15,62
	100	7,26	6,82	3,08	4,40	21,56
	200	5,50	9,02	3,30	3,74	21,56

Cuadro 12. Producción de CO₂ en mg/10 g en el suelo La Mora incubado por un período de 6 semanas a 28-30°C y 0,33 bares de tensión

Tratamiento	ppm	1 semana	2 semanas	4 semanas	6 semanas	Total
Glucosa	0	4,84	6,38	5,50	4,40	21,12
	50	6,38	8,58	4,62	2,86	22,44
	100	9,46	10,56	5,72	3,74	29,48
	200	9,68	7,92	8,14	2,86	28,60
	400	7,04	12,76	5,72	3,52	29,04
Nitrógeno	0	5,72	7,26	6,38	3,30	22,66
	25	9,46	9,24	3,30	3,96	25,96
	50	8,36	12,54	3,52	3,74	28,16
	100	9,24	10,34	7,92	2,42	29,92
	200	9,24	12,98	3,52	3,96	29,70
Fósforo	0	7,48	6,16	4,84	3,96	22,44
	50	8,58	7,26	4,18	4,18	24,20
	100	5,94	9,24	5,06	2,64	22,88
	200	6,16	9,68	6,16	2,20	24,20
	400	8,58	11,22	6,16	1,98	27,94
Calcio	0	8,36	6,82	4,62	2,42	22,22
	50	7,26	9,02	3,30	2,86	22,44
	100	8,14	9,02	4,84	2,20	24,20
	200	9,02	8,80	4,40	1,76	23,98
	400	7,26	10,34	5,28	4,40	27,28
Magnesio	0	6,60	9,02	5,28	3,52	24,42
	25	10,78	5,72	2,42	2,20	21,12
	50	10,56	7,70	2,20	1,76	22,22
	100	8,58	7,26	3,52	2,64	22,00
	200	7,48	7,04	5,06	2,42	22,00
Azufre	0	5,94	8,80	3,30	4,18	22,22
	25	8,36	7,92	2,64	2,64	21,56
	50	7,92	6,38	3,30	2,86	20,46
	100	9,24	7,92	3,52	4,40	25,08
	200	6,60	7,92	4,40	4,40	23,32

Cuadro 13. Tasas de producción de CO₂ y análisis de variancia para el suelo La Mora

	Niveles					Σ	\bar{X}
	1	2	3	4	5		
Glucosa	1.2887	0.4947	0.7802	0.9941	1.9606	3.9579	0.7915
Nitrógeno	2.1618	-3.6139	-1.4228	2.0518	-2.1151	-2.9381	-0.5876
Fósforo	-1.3979	-2.7168	1.5759	2.7853	1.3429	1.5894	0.3178
Calcio	-1.4625	-1.3807	-0.3214	-1.3442	0.2501	-4.2587	-0.8517
Magnesio	0.7923	-5.8183	-5.0718	-2.6778	-0.2456	-13.0212	-2.6042
Azufre	-0.9399	-3.1551	-2.7041	-3.8030	-0.7738	-11.3759	-2.2751

Fuentes de variación	G.L.	S.C.	C.M.	Fc
Niveles	4	34.482	8.620	2.846
Fuentes	5	46.170	9.234	3.049 *
Error	20	60.564	3.028	
Total	29	141.217		

* Significativo 5%

METODO DEL AZUFRE TOTAL MODIFICADO

Pesar 0,5 g de suelo, colocar en un erlenmeyer de 125 ml y agregar 10 ml de ácido nítrico-ácido perclórico concentrados (5:1), digerir en plancha, lavar con HNO_3 2,5% y llevar a volumen de 50 ml. Posteriormente adicionar 10 ml de una solución de $\text{KNO}_3 + \text{HNO}_3$, evaporar a sequedad en la plancha con calentamiento gradual y enfriar. Agregar 5 ml de HNO_3 25% (v/v), digerir de nuevo por una hora en la plancha, extraer las sales solubles con agua y filtrar la solución a través de un papel filtro Whatman No. 42, llevar a volumen final de 50 ml. Tomar una alícuota de 10 ml para estimar turbidimétricamente el sulfato.

Para preparar la solución de $\text{KNO}_3 + \text{HNO}_3$ se procede así: pesar 100 gramos de KNO_3 y disolver en 600 ml de agua destilada, agregar 350 ml de HNO_3 concentrado y diluir todo a un litro.

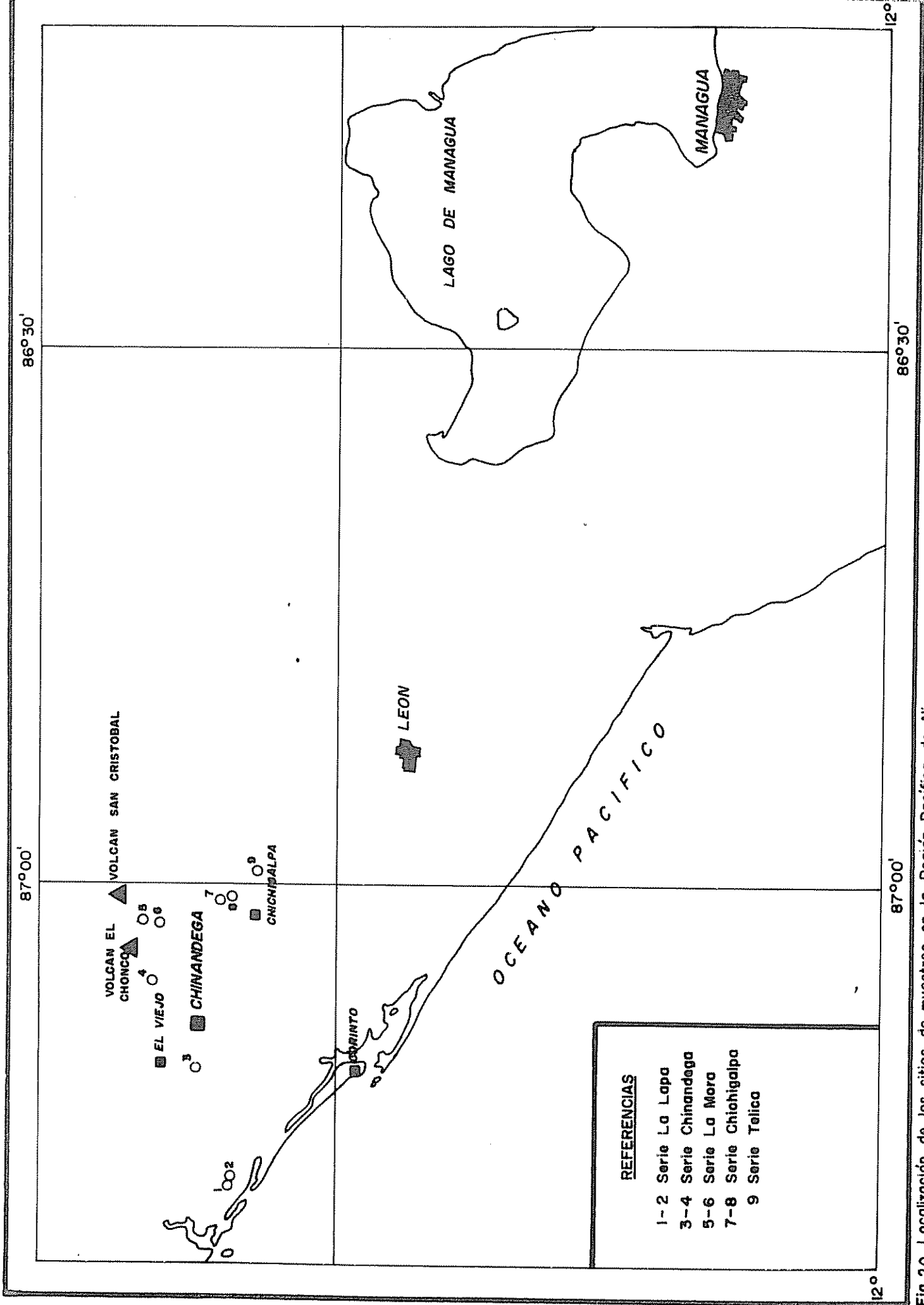


Fig.20 Localización de los sitios de muestreo en la Región Pacífica de Nicaragua.