

1.055.
UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA ORIENTAL DEL URUGUAY

FACULTAD DE AGRONOMIA

MONTEVIDEO

TESIS

EVALUACION PRIMARIA DE ALGUNOS METODOS DE

AUMENTAR LA DISPONIBILIDAD DE FOSFORO

DESDE ROCA SIN TRATAMIENTO QUIMICO

Hector M. Gonzalez

HECTOR M. GONZALEZ GONÇALVES

FACULTAD DE AGRONOMIA



DEPARTAMENTO DE
DOCUMENTACION Y
BIBLIOTECA

El presente trabajo fue realizado en el Centro de Investigaciones Agrícolas "A. Boerger", y constituye el requisito final para la obtención del título de Ingeniero Agrónomo.

Junio de 1975

3 SET. 1975

AGRADECIMIENTOS

A la Dirección del Centro de Investigaciones Agrícolas "Alberto Boenger", por permitir la realización de esta tesis.

Al Ing. Agr. José L. Castro, por la invalorable orientación y conducción del presente trabajo.

A Manuel Novella, por las valiosas sugerencias e información brindadas.

A Wilfredo Ibáñez, por la colaboración en la realización de los trabajos estadísticos.

Al personal de laboratorio y campo del Proyecto Suelos por la asistencia en las distintas etapas del trabajo.

9 SEP 1975

TABLA DE CONTENIDO

	Página
INTRODUCCION	1
REVISION BIBLIOGRAFICA	3
Oxidación de azufre elemental en el suelo	3
Factores que afectan la oxidación de azufre elemental	6
Humedad	6
pH	8
Temperatura	9
Población microbiana	9
Tamaño de partícula y relación roca fosfatada-azufre	11
Enmiendas	13
Porosidad de la fusión	14
Textura del suelo	15
Resultados obtenidos en la solubilización de fosforitas por el método biológico	16
MATERIALES Y METODOS	23
Ensayo de campo	23
Incubación	24
Determinación de fósforo	27
Determinación de sulfatos	28

	Página
RESULTADOS Y DISCUSION	29
Ensayo de campo	29
Incubación	38
Pradera Parda	39
Planosol	39
Pradera Arenosa	45
Grumosol	51
CONCLUSIONES	54
BIBLIOGRAFIA CITADA	57
APENDICE	60

LISTA DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Suelos utilizados y algunas de sus características	25
2	Producción de materia seca total (trébol blanco + maleza) en kg/há, de los cuatro cortes con diferentes fuentes de fósforo .	29
3	Fósforo total absorbido (Trébol blanco + maleza) en kg/há de los cuatro cortes con diferentes fuentes de fósforo	30
4	Producción de materia seca (trébol blanco + maleza) en kg/há con diferentes fuentes .	34
5	Fósforo absorbido (kg/há) calculado sobre materia seca total, con diferentes fuentes	35

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Primer corte. Producción de materia seca (trébol blanco + maleza) con diferentes dosis y fuentes de fósforo	31
2	Primer corte. Fósforo absorbido calculado sobre materia seca total (trébol blanco + maleza) con diferentes dosis y fuentes de fósforo	31
3	Segundo corte. Producción de materia seca (trébol blanco + maleza) con diferentes dosis y fuentes de fósforo	31
4	Segundo corte. Fósforo absorbido calculado sobre materia seca total (trébol blanco + maleza) con diferentes dosis y fuentes de fósforo	31
5	Producción de materia seca (trébol blanco + maleza) con diferentes dosis y fuentes de fósforo. Tercer corte	32
6	Fósforo absorbido calculado sobre materia seca total (trébol blanco + maleza) con diferentes dosis y fuentes de fósforo. Tercer corte	32
7	Producción de materia seca (trébol blanco + maleza) con diferente dosis y fuente de fósforo. Cuarto corte	32
8	Fósforo absorbido calculado sobre materia seca total (trébol blanco + maleza) con diferentes dosis y fuentes de fósforo. Cuarto corte	32
9	Producción de materia seca total (trébol blanco + maleza) de los cuatro cortes acumulados con diferentes dosis y fuentes de fósforo . .	33

10	Fósforo absorbido calculado sobre materia seca total (trébol blanco + maleza) de los cuatro cortes acumulados con diferentes dosis y fuentes de fósforo	33
11	Pradera parda. Evolución del contenido de fósforo disponible durante la incubación, determinado por el método de Bray y Kurtz No. 1	40
12	Pradera parda. Evolución del contenido de fósforo disponible durante la incubación, determinado por el método de Resinas Catiónicas	41
13	Pradera parda. Evolución del contenido de SO_4 durante la incubación, determinados por el método de Resinas Catiónicas	42
14	Planosol. Evolución del contenido de fósforo disponible durante la incubación, determinado por el método de Bray y Kurtz No. 1	43
15	Planosol. Evolución del contenido de fósforo disponible durante la incubación, determinado por el método de Resinas Catiónicas	44
16	Planosol. Evolución del contenido de SO_4 durante la incubación, determinados por el método de Resinas Catiónicas	46
17	Pradera arenosa. Evolución del contenido de fósforo disponible durante la incubación, determinado por el método de Bray y Kurtz No.1	47
18	Pradera arenosa. Evolución del contenido de fósforo disponible durante la incubación, determinado por el método de Resinas Catiónicas	48
19	Pradera arenosa. Evolución del contenido de SO_4 durante la incubación, determinados por el método de Resinas Catiónicas	49

20	Grumosol. Evolución del contenido de fósforo disponible durante la incubación, determinado por el método de Bray y Kurtz No. 1	50
21	Grumosol. Evolución del contenido de fósforo disponible durante la incubación, determinado por el método de Resinas Catiónicas	51
22	Grumosol. Evolución del contenido de SO_4 durante la incubación, determinado por el método de Resinas Catiónicas	53

INTRODUCCION

La información que se posee del contenido de fósforo de los suelos del país permite esperar, con excepción de casos particulares, una importante respuesta a la aplicación de este elemento. Esto queda confirmado por infinidad de trabajos realizados con cultivos y pasturas.

Existe información en otros países, del aumento que se produce en la disponibilidad de fósforo aplicado como roca sin tratamiento químico si ésta es agregada al suelo con azufre elemental, ya sea en forma de mezcla física o fusión. Sin duda que este método de obtener fósforo disponible será más económico que el clásico, ya que se obvian procesos industriales que elevan marcadamente su costo. Además, no todas las rocas fosfatadas son adecuadas para la fabricación de superfosfato, ya que aquellas que contienen un alto porcentaje de aluminio y hierro no son prácticamente utilizables (Doak, Gallaheer, Evans, y Muller, 1965). Si bien estos autores obtuvieron resultados alentadores en ensayos a corto plazo, en los cuales fueron utilizados estos materiales con previa calcinación, existen rocas fosfatadas con alto contenido de aluminio que no aumentan su porcentaje de fósforo disponible al ser calcinadas, o que tienen buen comportamiento en suelos calcáreos, pero bajo en ácidos (Doak, Gallaheer, Evans, y Muller, 1965).

teniendo en cuenta estos resultados, y la importancia que posee el fósforo en la producción agropecuaria del país, el Proyecto Suelos del Centro de Investigaciones Agrícolas "Alberto Boeger" ha encarado una línea de investigación para determinar la eficiencia de un método biológico de solubilización de fosforitas, y su viabilidad económica en nuestras condiciones. El presente estudio es parte de ello y consta de dos ensayos:

1. Ensayo de campo

Hiperfosfato en mezcla física con azufre elemental es comparado con hiperfosfato solo y superfosfato como fuente de fósforo para trébol blanco. Se realizan determinaciones de materia seca producida y fósforo absorbido.

2. Incubación

Se trata de evaluar por métodos químicos el efecto producido en la disponibilidad de fósforo aplicado como roca fosfatada en mezcla física o fusión con azufre elemental en cuatro suelos.

Oxidación de azufre elemental en el suelo

De acuerdo con Alexander (1961), no todas las reacciones ligadas a la oxidación de azufre son biológicas, pudiéndose dar una lenta oxidación por mecanismos puramente químicos. La oxidación biológica en las condiciones óptimas de temperatura y humedad se realiza a mucha mayor velocidad tornando insignificante a la segunda.

La transformación microbiana del azufre puede ser agrupada en cuatro categorías: asimilación de azufre, oxidación de azufre elemental y compuestos inorgánicos azufrados, y reducción de sulfatos y compuestos incompletamente oxidados. (Starkey, 1966).

Los microorganismos que oxidan el azufre inorgánico del suelo se pueden clasificar en:

- a. bacterias heterótrofas, hongos y actinomicetes;
- b. bacterias no filamentosas quimiotróficas del género *Thiobacillus*;
- c. bacterias filiformes representadas por *Beggiathea*, *Thiothrix*, *Thioplaca* y otros;
- d. bacterias verdes y púrpuras del azufre.

De éstos, sólo los dos primeros grupos son destacados en los suelos de cultivo (Starkey, 1966; Alexander, 1961; Waskman, 1963).

De acuerdo con Guittouneau y Keilling (1932), citados por Starkey (1966), los microorganismos del grupo a oxidarían el azufre a tiosulfatos, tetrathionatos y pentathionatos. Estos compuestos intermedios serían completamente oxidados en el suelo.

El género *Thiobacillus* es reconocido como uno de los más importantes en la oxidación de azufre elemental (Breed, Murry y Smith (1957), citados por Attoe y Olson (1966); Kittams y Attoe, 1965).

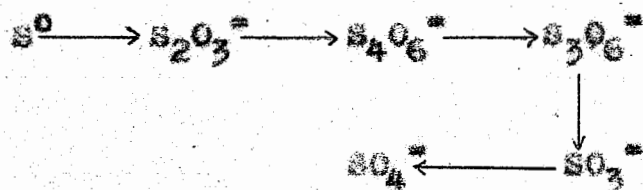
Si bien dentro de este género se destaca *Thiobacillus thiooxidans*, se ha encontrado oxidación de azufre elemental aunque a menor velocidad, por *Th. thioparus* (Vishniac y Santer, 1957). Una observación similar ha sido realizada con *Th. denitrificans* que utiliza el azufre como dador de electrones en presencia de nitratos (Vishniac y Santer, 1957). Además, ha sido encontrada oxidación de azufre por *Th. ferroxidans* (Starkey, 1966).

Th. thiooxidans y *Th. ferroxidans* se aíslan raramente de los suelos, excepto cuando existen cantidades importantes de azufre o sulfuro y la reacción es ácida. Por lo contrario, *Th. thioparus*, *Th. denitrificans* y *Th. novellus*, ocurren comúnmente en los suelos (Starkey, 1966).

Starkey (1950), y Kittams y Attoe (1965), reafirman la importancia de *Th. thiooxidans* con el resultado de que la

oxidación de azufre es mayor en presencia de este microorganismo. Además, Moser y Olson (1953), piensan que la gran oxidación producida en uno de los suelos utilizados en incubación es posiblemente debida a la presencia de Th. thiooxidans. Waskman (1963), describe este microorganismo como un pequeño bastón inmóvil, autótrofo obligado, aerobio estricto, de 0.75-1.0 por 0.5-0.75 μ que produce un moteado en todo el medio de cultivo sin producir película. No forma esporas, siendo destruido por temperaturas de 55-60°C en varios minutos. Las limitaciones debidas a pH, son fijadas por el autor en 6 y 1, no obstante es posible acostumar a estos microorganismos a un ambiente neutro o inclusive alcalino. Varios autores (Starkey, 1950; Vishniac y Santer, 1957), coinciden en su capacidad de soportar medios muy ácidos. De acuerdo con Hermesen (1958), citado por Vishniac y Santer (1957), puede llegar a producir pHs negativos.

Los pasos seguidos en la oxidación de azufre y los mecanismos por los cuales las bacterias comienzan la oxidación no son completamente conocidos, y existe un conjunto de hipótesis para su explicación. En relación a lo primero, Alexander (1961) presenta la siguiente síntesis del esquema propuesto por Vishniac y Santer (1957):



Vogler y Umbreit (1941), citado por Vishniac y Santer (1957), realizaron un estudio sobre los agentes activos de la superficie, tamaño de partícula y efecto de la interposición de una membrana dializada en la oxidación de azufre por Th. thiooxidans, así como el comportamiento al microscopio de estas bacterias en presencia de azufre y concluyeron que es necesario el contacto directo entre la bacteria y el azufre para que se produzca la oxidación.

Factores que afectan la oxidación de azufre elemental

Humedad

Moser y Olson (1953), en ensayos de incubación utilizando suelos de diferente textura y capacidad oxidante en el campo, encontraron que la mayor oxidación se producía entre 0.029 y 0.059 atmósferas de tensión de agua. Estos autores concluyen que, aunque no hay recopilada información en relación al descenso en el nivel de oxidación de azufre en bajas tensiones de agua en el suelo (menores de 30 cm de agua), es posible que la insuficiente aeración sea la responsable.

Bhaumik y Clark (1947), citado por Moser y Olson (1953), encontraron que la mayor producción de anhídrido carbónico en cinco suelos con diferente textura, se produjo a una tensión de agua de 0.05 atmósferas. En oposición a esto, Wakaman (1927), citado por Moser y Olson (1953), sugiere como óptima

humedad para la oxidación de azufre a 50 por ciento de la capacidad de campo. Rowntree (1933), citado por Vitols y Swaby (1969), estudió la oxidación de azufre en algunos suelos australianos. Encontró que la humedad óptima estaba entre 50 y 90 por ciento del contenido de saturación.

Kittams y Attos (1965), incubaron un suelo franco limoso a $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$, el cual se humedeció en un rango de 6 a 48 por ciento (la capacidad de campo es de 24 por ciento). El suelo fue premezclado con 500 ppm de azufre. La humedad descendió menos de 2 por ciento durante el período de incubación. Luego de una semana la oxidación aumenta con el ascenso de la humedad hasta llegar próximo a capacidad de campo, decayendo después rápidamente. En la segunda semana, se da un importante ascenso hasta una humedad de 18 por ciento, produciéndose luego una caída aunque menos brusca. Pasada la cuarta semana, se da una situación similar hasta 15 por ciento, manteniéndose constante hasta 48 por ciento. Los autores concluyen que si bien esto implica que hay un amplio rango de humedad en el cual la oxidación es intensa, debe tenerse en cuenta que en las condiciones en las cuales se trabajó la difusión de oxígeno era fácil pues la profundidad del suelo era de sólo 2 cm. Esto está de acuerdo con Attos y Olson (1966), quienes concluyen que el exceso de humedad en el suelo actuaría a través de la falta de aereación lo que llevaría a una drástica disminución en la

concentración de bacterias aeróbicas. Además, Jordan y Reissner (1957), citado por Attee y Olson (1966), recalcan que cuando las condiciones de anaerobiosis se mantienen por un largo período, la oxidación biológica de azufre llegaría a retardarse.

pH

De acuerdo con Burns (1967), citado por Blair (1971), la oxidación del azufre se lleva a cabo rápidamente en pH entre 4.0 y 9.6.

Fox et al (1964), citado por Attee y Olson (1966) con el agregado de 1000 ppm de carbonato de calcio a un suelo franco arenoso (pH 6.5), aumentó la oxidación de azufre a sulfato que se producía en la incubación a 22,8°C. Este aumento era importante en los tamaños de partículas más pequeños, no así en los mayores. El muestreo se realizó a la primera, segunda, cuarta y octava semana. En un experimento similar Ludwick (1965), citado por Attee y Olson (1966), encontró que encalando un suelo franco arenoso con pH 5.2 hasta obtener pH 6.3, 7.0 y 7.5, se incrementaba la oxidación del azufre elemental agregado entre 10 y 20 por ciento sobre el suelo original.

Vietelins y Swaby (1969), encontraron que en una muestra de 273 suelos australianos, la oxidación de azufre frecuentemente era baja en aquellos muy alcalinos.

Temperatura

Fox et al (1964), citado por Attee y Olson (1966), obtuvo en un suelo arenoso el cual fue incubado durante cuatro semanas con el agregado de azufre (166 ppm), diferencias importantes entre el tratamiento a $4,4^{\circ}\text{C}$ y $22,8^{\circ}\text{C}$. El segundo tratamiento se torna muy superior (medido en producción de sulfato o descenso de pH), cuando se utilizan tamaños pequeños de partícula. Un efecto similar de la temperatura es reportado por Caldwell et al (1964), citado por Attee y Olson (1966). De acuerdo con estos autores, Li y Caldwell (1966), citado por Blair (1971), concluyen que incrementos en la temperatura por debajo de 40°C , resultan en aumentos en la oxidación de azufre.

Kountree (1933), citado por Vitolina y Swaby (1969), encontró que la temperatura óptima para la oxidación de azufre estaba entre 20° y 30°C .

Población microbiana

Starkey (1950), señala que si bien el azufre es oxidado más rápidamente por Th. thiooxidans que por microorganismos heterótrofos, es posible encontrar oxidación en suelos fértiles con ausencia de los primeros, si se les suministra materia orgánica de fácil descomposición.

Vitolina y Swaby (1969) encontraron que en 273 muestras compuestas de suelos australianos, sólo en la tercera parte

la oxidación de azufre era buena, moderada a pobre en la mitad, y nula en el sexto remanente.

Moser y Olson (1963), descubrieron diferencias importantes en la población microbiana de dos suelos los cuales habían manifestado diferente capacidad de oxidar azufre elemental a sulfato en ensayos de campo. Las muestras del suelo que tenían mayor capacidad oxidante (franco limoso), contenían una población de Th. thiooxidans marcadamente superior al otro. Esta diferencia se incrementaba cuando se producía un agregado previo de azufre. Th. denitrificans se encontraba con igual magnitud en los dos suelos y no se producían diferencias de acuerdo al manejo anterior.

Kittens y Attee (1965), constataron una importante mejora en la capacidad oxidante de azufre de diez suelos tras la inoculación con una suspensión de un suelo (pH 6.6) previamente tratado con azufre y que se había determinado tenía una buena población de estos microorganismos. Los autores utilizan una muestra de suelos con amplia variación en su capacidad oxidante. Al final de dos semanas de incubación a temperatura ambiente, la oxidación de azufre era una a once veces mayor en los suelos inoculados que en aquellos sin inocular. Luego de cuatro semanas, el promedio de oxidación en los suelos inoculados fue de 54 por ciento, mientras que en los restantes fue de 23 por ciento. Waskman (1963), recalca que la inoculación con un medio rico en microorganismos oxidantes de azufre produce un aumento importante en la velocidad de oxidación lo que denota, además, que es un proceso biológico.

Tamaño de partícula y relación roca fosfatada-azufre

Fox et al (1964), citado por Attos y Olson (1966), en un ensayo en el cual combina tratamientos de temperatura con tamaño de partícula, encontró importantes diferencias en el porcentaje de azufre oxidado para esta última variable. Mientras en los tamaños más pequeños (polvo), y para la temperatura de 22.8°C , la oxidación era luego de la cuarta semana de incubación, aproximadamente el 50 por ciento del agregado, en los mayores (malla 16), apenas alcanzaba al 5 por ciento.

Un resultado similar obtuvo en el ensayo que combinó tamaño de partícula y encalado; en éste la oxidación de azufre aumentó con el encalado en los tamaños pequeños de partícula, pero no en los mayores. El tamaño de partícula fue más importante que el encalado dándose mayor oxidación en los tamaños pequeños para los dos tratamientos de encalado. Bertramson, Fried y Tisdale (1950), obtuvieron datos similares utilizando partículas de diferente tamaño. Las partículas de menor tamaño (80 mallas), se oxidaban más rápidamente y por consecuencia eran las más efectivas en bajar el pH del suelo.

Fenster (1965), citado por Attos y Olson (1966), incubó un suelo franco limoso (pH 6.6) con agregado de azufre (1000 ppm) en varios tamaños de partícula. El porcentaje de azufre oxidado al final de dos semanas estaba inversamente correlacionado con el tamaño de partícula. Luego de la octava semana

el porcentaje de azufre recuperado como sulfato se encontraba en 5 para los tamaños de 5-10 mallas, y en 99 para los de 120-170 mallas de finura. Muestras posteriores mostraron una caída del porcentaje de azufre recuperado en los tamaños inferiores. Esto es atribuido por el autor a la fijación mineral de los sulfatos o a la fijación biológica del azufre por microorganismos. Además, en otro estudio en el cual determinó la importancia de la porosidad de la fusión roca fosfatada-azufre, encontró un marcado efecto del tamaño de partícula.

Kittams y Attce (1965), estudiaron el efecto del tamaño de partícula de azufre elemental y roca fosfatada-azufre (relación 2:1). Utilizó un suelo franco limoso (pH 7.9 y 18 por ciento de carbonato de calcio equivalente). El nivel de aplicación de azufre fue de 333 ppm en la mezcla roca fosfatada-azufre o solo. La recuperación de azufre en alfalfa (cinco cortes), fue de 14 a 100 por ciento para la aplicación de azufre solo en las formas de 20-40 mallas y menos de 270 mallas, respectivamente. La recuperación para el caso en que se aplicó roca fosfatada-azufre fue de 31 y 85 por ciento para idénticos tamaños de partícula. En los dos casos, se dan recuperaciones intermedias para los tamaños comprendidos entre 20-40 y 270 mallas. Los tratamientos tuvieron poco efecto en el pH del suelo debido, de acuerdo con el autor, al alto porcentaje de carbonato de calcio presente.

Dingado (1962), citado por Kittans y Attce (1965), contestó que en las partículas más pequeñas de la fusión roca fosfatada-azufre, la disponibilidad de fósforo para el raigrás en el primer corte era mayor, mientras que luego del sexto corte el fósforo recuperado era similar para todos los tamaños.

Enmiendas

Kittans (1963) citado por Attce y Olson (1966), estudió el efecto de diferentes enmiendas en la oxidación de azufre, sobre un suelo franco limoso (pH 6.6). Incubó durante seis semanas a temperatura ambiente. Los tratamientos utilizados fueron: carbonato de calcio a los niveles de 0, 5.000, 10.000 y 20.000 ppm; nitrógeno como nitrato de amonio a 200 ppm; fósforo como fosfato monocalcico hidratado a 100 ppm; azúcar de caña 100 ppm; y sulfato de calcio a 500 ppm. Se humedeció hasta cubrir dos terceras partes de la capacidad de campo. El porcentaje de azufre oxidado (se agregaron 500 ppm de azufre), varió de 33 con agregado de azúcar a 61 para 20.000 ppm de carbonato de calcio. Si bien ninguno de los tratamientos afectan marcadamente la oxidación de azufre, el carbonato de calcio, en los dos mayores niveles la incrementa en alrededor de 10 a 15 por ciento mientras que el azúcar lo deprime en idéntica magnitud.

FACULTAD DE AGRONOMIA



DEPARTAMENTO DE
DOCUMENTACIÓN Y
BIBLIOTECA

Vitelins y Swaby (1969), realizaron una incubación previa con agregado de azufre, dos compuestos orgánicos de azufre, y siete compuestos sódico-azufrados. En todos los casos se agregó 0.015 por ciento de azufre. La incubación se efectuó durante una, dos y cuatro semanas agregándose luego 0.5 por ciento de azufre con o sin 0.15 por ciento de almidón o 0.15 por ciento de aspargina. Sólo tiosulfato de sodio y sulfito de sodio estimularon la oxidación de azufre, mientras que cisteína y methionina la deprimieron. El agregado de almidón no afectó la oxidación, pero la aspargina lo deprimió, posiblemente por una elevación inicial de pH y supresión de los microorganismos autótrofos.

Porosidad de la fusión

Fenster (1965), citado por Attes y Olson (1966), determinó la importancia de la porosidad de la fusión roca fosfatada-azufre en la oxidación de azufre. Los poros fueron obtenidos por fusión de la mezcla roca fosfatada-azufre-cloruro de potasio, en la relación 1:1:1. Luego de enfriado es triturado y tamizado para conseguir varios tamaños de partícula. El cloruro de potasio es completamente removido, haciendo pasar agua caliente. Se utiliza un suelo franco limoso (pH 6.6), al cual se le mezclan 100 ppm de fósforo (690 ppm de azufre) de la fusión descripta. Se sembró raigrás el cual se cortó ocho veces en un período de un año. El azufre oxidado fue medido a

través de la absorción del cultivo y del contenido de sulfato remanente en el suelo. El porcentaje de oxidación fue de alrededor de 50 para 10 a 20 mallas de tamaño de partícula sin poros, a 80 con el mismo tamaño pero con poros de 120-170 mallas. Para 5-10 mallas de tamaño el rango fue de 25 por ciento para el tratamiento de 40-80 mallas de tamaño de poros a 49 por ciento para poros de 120-170 mallas.

Kittams y Attos (1965), encontraron importante efecto de la porosidad de la fusión roca fosfatada-azufre elemental en el rendimiento de raigrás y recobro de fósforo en ensayos maceteros.

Textura del suelo

Moser y Olson (1953), encontraron que en las tensiones de agua más favorables, la oxidación de azufre estaba en relación directa con el porcentaje de arcilla. El 66 por ciento del azufre agregado fue oxidado en el suelo limo-arcilloso y sólo 20 por ciento en el franco-arenoso. Los suelos franco y franco-limoso se comportan en forma intermedia siendo mayor la oxidación en este último.

Kittams y Attos (1965), realizaron una incubación utilizando 29 tipos de suelos de Wisconsin a los cuales se les agregó azufre elemental (250 ppm). Las muestras fueron humedecidas hasta capacidad de campo y se realizaron muestreos a la primera, segunda y cuarta semana. El promedio de azufre

oxidado en estos periodos fue de 13, 27, y 40 por ciento, respectivamente. Contrariamente a lo anterior, no encontraron una relación consistente entre oxidación y tipo de suelo, pH o capacidad de campo. Además Vitolina y Sweby (1969), usando 273 muestras de suelos de Australia en una incubación con azufre durante 10 días y a 25°C, no detectaron una correlación clara entre el porcentaje de azufre oxidado y textura de los suelos.

Resultados obtenidos con la solubilización de fosforitas por el método biológico

Varios investigadores han encontrado aumentos en la disponibilidad de fósforo por mezclado de la roca fosfatada con azufre antes de la aplicación. Así Lipman et al (1916) y Fenster (1964), citados por Ashby, Fenster y Attoe (1966), utilizaron mezcla simple y fusión porosa respectivamente. Ames (1921), citado por Alexander (1961), concluye que la oxidación de azufre aumenta la cantidad de fosfato soluble así como de potasio, calcio, manganeso, aluminio y magnesio.

Lipman, McLean y Lint (1916), citados por Kittams y Attoe (1965), fueron los primeros en mezclar roca fosfatada con azufre antes de su aplicación en el suelo obteniendo resultados favorables. Esta no podía ser aplicada como sustituto del superfosfato en escala comercial, pues el costo adicional del azufre no lo permitía.

Fisher y Norman (1970), realizaron un ensayo de campo sobre un suelo franco-arenoso en el que compararon "brosuper" (roca fosfatada con alto contenido de aluminio y hierro, sólida hasta pasar malla 200, peleteada con 15 por ciento de azufre elemental, e inoculada con Thiobacillus thiooxidans) con superfosfato. A mediano plazo el comportamiento de "brosuper" era, en todos los casos, similar al del superfosfato con excepción del nivel más alto de aplicación (1.045 kg/há). Los autores concluyen que la roca utilizada se comporta bien para la fabricación de "biosuper".

Kittams y Attoe (1965), utilizando un suelo franco limoso (pH 6.6) en un ensayo macetero, compararon el efecto del agregado de azufre en la disponibilidad de fósforo en roca fosfatada de Florida (14 por ciento de fósforo, 90 por ciento pasaba la malla 230). Parte del suelo fue encalado hasta obtener un pH de 7.5. El azufre fue agregado en fusión con la roca fosfatada (relación 2:1), con un tamaño de partícula de 8 a 20 mallas, en polvo, o en forma granular con tamaño idéntico al de la fusión. El azufre, en todos los casos, se aplicó junto con la roca. El fertilizante fue mezclado a nivel de 48 o 96 ppm de fósforo con la totalidad del suelo, o solo con la parte superficial.

En el suelo sin encalar el rendimiento de raigrás y el fósforo absorbido son netamente superiores cuando se aplica roca fosfatada-azufre en fusión. En el encalado éstas son

menores pero continúan siendo significativos. La fusión aplicada en la superficie de la maceta tuvo mayor efecto pues todo el fósforo asimilable que quedaba como consecuencia del descenso de pH era utilizado por el raigrás. El fosfato monocalcico utilizado produjo mayores rendimientos y recuperación de fósforo que los demás tratamientos. Estos autores encontraron en un ensayo macetero con un suelo franco-limoso (pH 7.9), al que se le agregó roca fosfatada-azufre elemental en fusión (2:1) con finuras desde 20-40 a 270 mallas, que los rendimientos de alfalfa eran bajos en los cinco cortes realizados debido a deficiencias en fósforo. Los autores concluyen que la baja solubilización se debe a la inactivación del ácido sulfúrico producido por el alto contenido de carbonato de calcio libre del suelo.

Meller (1956), realizó un ensayo de invernáculo para determinar el efecto del agregado de azufre en la solubilización del fósforo aplicado como roca molida (694.4 kg/há de P_2O_5). Se utilizó la capa superficial de un suelo que había sido encalado y al que se le agregó el equivalente a 7.5 toneladas de carbonato de calcio por hectárea. La roca fosfatada fue aplicada en superficie y se utilizaron niveles de azufre. Se sembraron 15 plantas de trébol y seis plantas de avena por maceta. En los tratamientos que se agregó azufre (mezclado con la parte superficial del suelo) a los niveles de 224.0, 448.0, y 896.0 kg/há, se encontraron aumentos significativos en rendimientos de trébol. El contenido de fósforo del trébol aumenta

en el tratamiento de 896.0 kg/há, y tiene un muy alto aumento para el tratamiento de 1.792 kg/há. Este último tratamiento reduce el pH a 5.47, el cual fue medido tres meses después del agregado de azufre. En el caso que no se agregó azufre, el pH era de 8.03. Aumentos pequeños en el agregado de azufre no producen efecto en la solubilización de fósforo desde la roca. La aplicación de 1.792.0 kg/há causa marcado aumento en el fósforo soluble extraído por la solución Morgan.

En avena se da algo similar pues en el tratamiento de 896.0 kg/há el contenido de fósforo es marcadamente superior al se toman los dos cortes conjuntamente. El aumento de crecimiento es significativo con 112.0 kg/há o más en el primer corte, no habiendo diferencias significativas en el segundo. En el nivel de 1.792 kg/há, la avena crece vigorosamente, y tiene un muy alto contenido de fósforo, mientras que el trébol se ve retardado. En este tratamiento, la avena tiene un contenido de fósforo cinco veces más alto que en que se agregó yeso, lo que es explicado por la oxidación de azufre y su efecto sobre la solubilización de la roca fosfatada.

En este trabajo además, se midió el efecto residual de los tratamientos utilizando fósforo radiactivo. El superfosfato fue usado al nivel de 56.0 kg/há de P_2O_5 y se mezcló con

la parte superficial del suelo. Para los dos cortes realizados en la avena, el rendimiento aumentó en el tratamiento de 896.0 kg/há de azufre por sobre el de yeso. En el segundo corte se da un aumento del rendimiento en los tratamientos de 112.0, 224.0 y 448.0 kg/há. En el tratamiento de 1.792.0 kg/há, el contenido de fósforo de los dos cortes aumenta pero no lo hace la producción de materia seca. Al final del periodo el pH para el suelo que se le había agregado yeso era de 7.28 mientras que al nivel de 1.796.0 kg/há de azufre era de 4.79.

Ashby, Fenster y Attee (1966), realizaron ensayo macetero utilizando raigrás sobre un suelo franco limoso (pH 6.0). El pH inicial es modificado a 7.0 en parte de las muestras, agregando hidróxidos de calcio y magnesio. Para estabilizar el pH durante el experimento fue agregada dolomita a nivel de 2.000 ppm, mezclándola con el suelo. Roca fosfatada previamente acidulada en diferente grado (12.5, 25.0, 50.0 y 100.0 por ciento de lo necesario para formar superfosfato triple), fue recubierta con azufre. Los niveles de azufre utilizados fueron 0, 1 y 2 veces lo necesario para acidificar completamente la roca sin atacar, considerando que la totalidad sería oxidado a sulfato. El nivel de azufre aplicado al tratamiento de 100 por ciento de acidulación es idéntico al de 50 por ciento. El fertilizante fosfatado se aplicó en una dosis que equivale a 50 ppm de fósforo. La aplicación de azufre en la roca parcialmente acidulada no aumentó significativamente los

los rendimientos de raigrás, pero el contenido de fósforo se incrementó en forma significativa en los tamaños de partícula de 5 a 10 mallas en muchos casos y particularmente en los altos niveles de azufre y en el suelo de pH 7. Los datos sugieren que la formación de ácido sulfúrico fue suficiente en muchos casos para reaccionar con una parte importante de la roca fosfatada sin atacar.

De acuerdo con los autores, una parte del ácido formado en la oxidación sería neutralizado por el suelo. Además, al acidificarse la zona que rodea a la partícula se incrementaría la actividad del hierro y aluminio, resultando en una mayor fijación del fósforo soluble. Es posible también, que la reacción de los ácidos sobre la roca fosfatada produzcan un precipitado de fosfato dicálcico sobre la roca no atacada con un posterior decrecimiento del efecto del ácido formado. El fluoruro de calcio de la roca podría convertir el azufre soluble en agua en fósforo insoluble por formación de fluorofosfato. El autor concluye que son necesarios más trabajos para determinar el método más efectivo de aplicar el azufre.

De acuerdo con los autores citados, podemos esperar un aumento en la disponibilidad de fósforo en roca sin tratar por el agregado de azufre elemental. Con niveles bajos de azufre, se han obtenido resultados cuando se realiza la aplicación

conjunta con la roca fosfatada, ya sea como mezcla o fusión, permitiendo de esta forma la acidulaci3n de s3lo peque1as zonas alrededor de las part3culas de roca. Si bien el aumento en la disponibilidad de f3sforo depende de una adecuada oxidaci3n de azufre aplicado, y por lo tanto de los factores que afectan a 3sta, pueden darse estas condiciones y el resultado no ser el esperado. Esto se deber3a a la neutralizaci3n del 3cido producido por carbonatos del suelo y/o por precipitaci3n de fosfato dic3lcico y fluoruro de calcio sobre la roca.

MATERIALES Y METODOS

Ensayo de campo

Con el fin de comparar la mezcla de hiperfosfato-azufre, con las dos fuentes de fósforo más utilizadas en el país, se instaló en un suelo de Pradera Parda sobre Formación Libertad (pH 6.1), de la Estación Experimental "La Estanzuela" del Centro de Investigaciones Agrícolas "Alberto Boerger", un ensayo con los siguientes tratamientos:

<u>Tratamiento</u>	<u>Unidades P₂O₅</u>
1 Testigo	0
2 250 kg/há superfosfato	50
3 500 kg/há superfosfato	100
4 250 kg/há hiperfosfato	75
5 500 kg/há hiperfosfato	150
6 250 kg/há mezcla hiperfosfato- azufre	62
7 500 kg/há mezcla hiperfosfato- azufre	124

La cantidad de azufre elemental agregado se calculó de tal forma que fuera la necesaria para la transformación total del fosfato tricálcico a fosfato monocálcico, asumiendo que la totalidad se oxida a sulfato (Batfield, 1964). La mezcla está compuesta por 17,8 por ciento de azufre y 82,2 por ciento de hiperfosfato. Los fertilizantes fueron utilizados con la finura comercial.

Trébol blanco (Trifolium repens cv. Estanzuela Zapicán) inoculado y peleteado fue sembrado el 7 de mayo de 1973, a razón de 10 kg/há de semilla limpia.

Se realizaron cuatro cortes (15/10/73, 29/11/73, 14/2/74, 19/3/74), en los cuales se determinó producción de materia seca y fósforo absorbido. Para la determinación de este último, se realizó una digestión de materia seca por el método de Hutton y Nye (1958), al cual se le introdujeron pequeñas modificaciones, utilizándose posteriormente el método colorimétrico descrito por Kitson y Mellon (1944).

Se utilizó un diseño factorial (3 fuentes x 2 niveles + 1 testigo), dispuestos en bloques al azar con cuatro repeticiones y parcelas de 2 x 4 mt. Con los datos de producción de materia seca y fósforo absorbido se realizaron análisis de variación, hallándose la Mínima Diferencia Significativa (L.S.D.). Se realizaron análisis de regresión ajustando curvas para las diferentes fuentes utilizadas en los datos de producción de materia seca y fósforo absorbido de los cuatro cortes acumulados.

Incubación

Se realizó con el propósito de comparar la eficiencia de dos métodos de agregar azufre elemental (mezcla y fusión) a roca fosfatada sin tratar. Además, se emplearon dos materiales fosfatados: hiperfosfato ("blendo"), Fosforita de Florida del Norte ("daro").

Se utilizaron los 15 en superiores de cuatro suelos, los cuales pertenecen a diferentes grandes grupos de acuerdo a la clasificación natural morfogenética de suelos del país. Los suelos utilizados y algunas de sus características, se detallan en el Cuadro No. 1.

Cuadro No. 1

<u>Gran Grupo</u>	<u>Material padre</u>	<u>Textura</u>		
Pradera Fértil	Libertad	franco-arcillo-limoso		
Planosol	Libertad	franco-limoso		
Pradera Arenosa	Asencio	arenoso-franco		
Gruposol	Libertad	franco-arcillo-limoso-pesado		
<u>Gran Grupo</u>	<u>pH(5.0)</u>	<u>pH(0.1)</u>	<u>Fósforo disponible</u>	
			<u>Res. Cat.</u>	<u>Bray Sol</u>
Pradera Fértil	5.4	4.5	2.0	5.1
Planosol	6.1	4.7	12.0	23.1
Pradera Arenosa	6.0	4.6	3.0	6.8
Gruposol	6.8	6.6	13.0	7.8

Los tratamientos empleados fueron los siguientes:

Tratamiento

- 1 Testigo + Fertilización básica (F.B.)
- 2 Superfosfato + F.B.
- 3 Hiperfosfato + F.B.
- 4 Fosforita de Florida del Norte + F.B.
- 5 Mezcla hiperfosfato-azufre + F.B.

Tratamiento

- 6 Mezcla Fosforita de Florida del Norte-S + F.B.
- 7 Fusión hiperfosfato-azufre + F.B.
- 8 Fusión Fosforita de Florida del Norte-S + F.B.

La fertilización básica incluye, por bolsa: MgCl_2 - 712 mg; KCl - 310 mg; NaCl - 106 mg; ZnCl_2 - 47 mg; CuCl_2 - 14 mg; $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ - 14 mg; H_3BO_3 - 10 mg; $\text{H}_2\text{SO}_4(96\%)$ - 0.0496 ml.

En el Apéndice la., se detalla la composición química de las rocas fosfatadas que se utilizaron, las cuales fueron molidas hasta 325 mallas de finura previo a la preparación del fertilizante.

La cantidad de azufre elemental agregado (325 mallas de finura) se calculó de idéntica forma que en el ensayo de campo. Las fusiones se realizaron calentando la roca hasta aproximadamente 120°C y agregando azufre con agitado continuo. Luego de enfriado se trituro hasta 250 mallas de finura. El superfosfato se emplea con la finura comercial.

Para asegurar una adecuada población de microorganismos oxidantes, se inculó la mezcla fosforita-azufre con un suelo de Pradera Parda sobre Formación Libertad altamente fertilizada con azufre, y que probó tener buena capacidad oxidante. Se agregó un gramo de este suelo cada cien gramos de mezcla.

El fertilizante fosfatado a razón de 80 unidades de P_2O_5 fue mezclado cuidadosamente con el suelo. Luego, con previo humedecimiento (80 por ciento de la capacidad de campo), éste fue acondicionado con una mezcladora de forma de mejorar su estructura, lo que permitiría obtener una más adecuada aereación.

Las bolsas de polietileno conteniendo 1.300 gr de suelo fueron cerradas y colocadas a $25^{\circ}C$ en una incubadora.

Cada 15 días, previo mezclado del suelo, se extrajo una muestra de aproximadamente 25 gr. Estas muestras son colocadas a secar durante 12 horas a una temperatura de $40^{\circ}C$. Inmediatamente son molidas hasta alcanzar aproximadamente un milímetro de finura, realizándose análisis para determinar contenido de fósforo disponible y sulfatos. Todos los análisis se realizaron por duplicado.

Determinación de fósforo

Los métodos utilizados fueron:

- a. Bray y Kurtz No. 1
- b. Resinas Catiónicas

El primero de estos fue utilizado como es descrito por Bray y Kurtz (1945), pero se aumentó el tiempo de extracción a 5 minutos.

El método de Resinas Catiónicas se utilizó como es descrito por Zamuz y Castro (1970).

Determinación de sulfatos

a. Bardsley y Lancaster

b. Resinas Catiónicas

El método de Bardsley y Lancaster se utilizó como es descrito por Bleck et al (1965), con la modificación que implica el reemplazar el carbón activado por cloruro férrico (1 por ciento peso/volumen).

En el método de Resinas Catiónicas (descrito para fósforo por Samuz y Castro, 1970), se sustituye la colorimetría utilizando la misma que en el método de Bardsley y Lancaster citado anteriormente.

RESULTADOS Y DISCUSION

Ensayo de campo

Los datos de materia seca total (trébol blanco + maleza), así como de fósforo absorbido obtenidos en los cuatro cortes se encuentran en los Cuadros No. 2 y No. 3 respectivamente.

Cuadro No. 2. Producción de materia seca total (trébol blanco + maleza) en kg/há, de los cuatro cortes con diferentes fuentes de fósforo.

Cortes	kg/há	1er	2do	3er	4to
Testigo		1.646	1.904	1.633	626
Superfosfato	250	1.916	1.900	1.738	610
	500	2.447	2.383	1.944	926
Hiperfosfato-azufre	250	2.076	2.002	1.796	708
	500	2.338	2.350	1.923	893
Hiperfosfato	250	1.444	1.682	1.623	688
	500	1.436	1.924	1.802	861

Cuadro No. 3. Fósforo total absorbido (trébol blanco + maleza) en kg/há de los cuatro cortes con diferentes fuentes de fósforo.

Cortes	kg/há	1er	2o.	3er	4to
Testigo		4.4	4.3	3.9	1.6
Superfosfato	250	5.0	4.9	4.7	1.7
	500	6.7	6.0	5.2	2.6
Hiperfosfato-azufre	250	5.7	5.1	4.8	2.0
	500	6.3	5.9	5.1	2.5
Hiperfosfato	250	3.5	4.0	4.1	1.8
	500	3.6	4.5	4.5	2.3

En las Figuras 1 a 8 se observan las respuestas para las diferentes fuentes utilizadas. Vemos que la mezcla hiperfosfato-azufre supera al superfosfato en la dosis de 250 kg/há, mientras que en la de 500 kg/há presenta valores levemente inferiores a este. En los tres primeros cortes, el hiperfosfato es superado por las restantes fuentes, mientras que en la dosis inferior del cuarto corte presenta valores intermedios. Los valores acumulados de producción de materia seca y fósforo absorbido de los cuatro cortes (Figuras 9 y 10), nos muestran que la mezcla hiperfosfato-azufre supera al hiperfosfato y superfosfato en la dosis inferior, mientras que es superado levemente sólo por este último en la dosis de 500 kg/há.

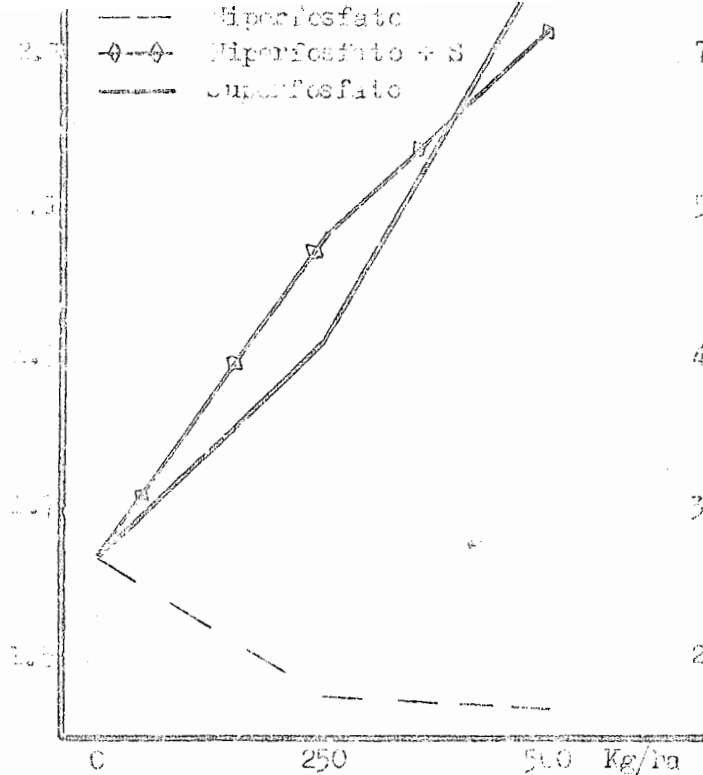


Figura 1. Primer corte. Producción de materia seca (trébol blanco + maleza) con diferentes dosis y fuentes de fósforo.

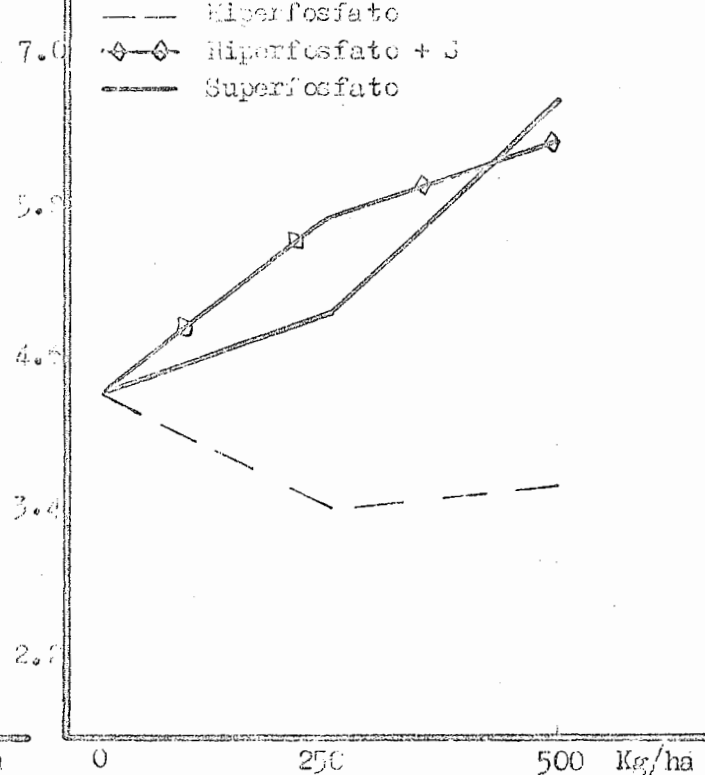


Figura 2. Primer corte. Fósforo absorbido calculado sobre materia seca total (trébol blanco + maleza) con diferentes dosis y fuentes de fósforo.

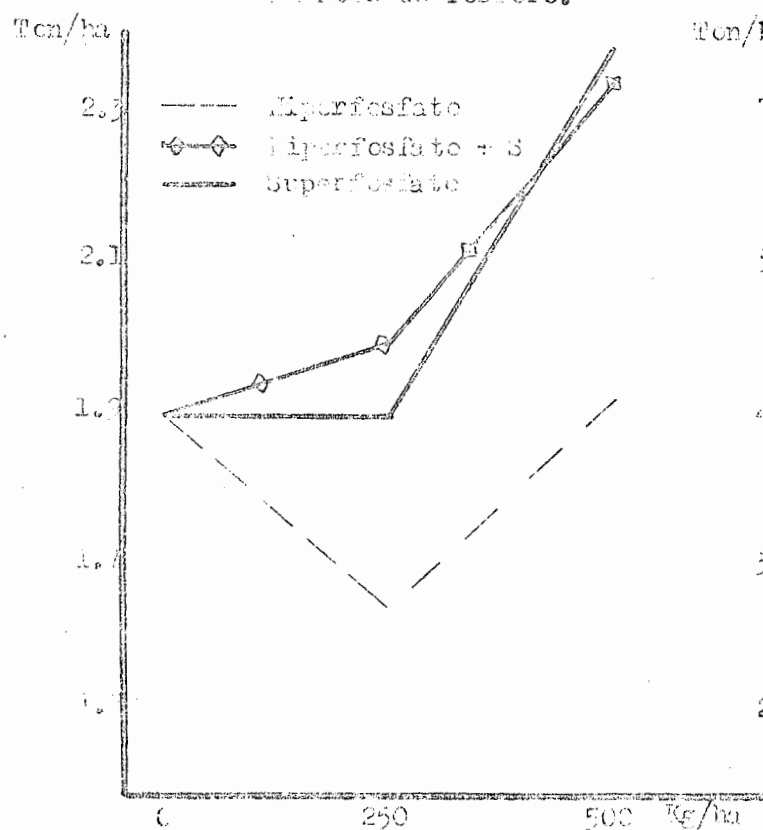


Figura 3. Segundo corte. Producción de materia seca (trébol blanco + maleza) con diferentes dosis y fuentes de fósforo.

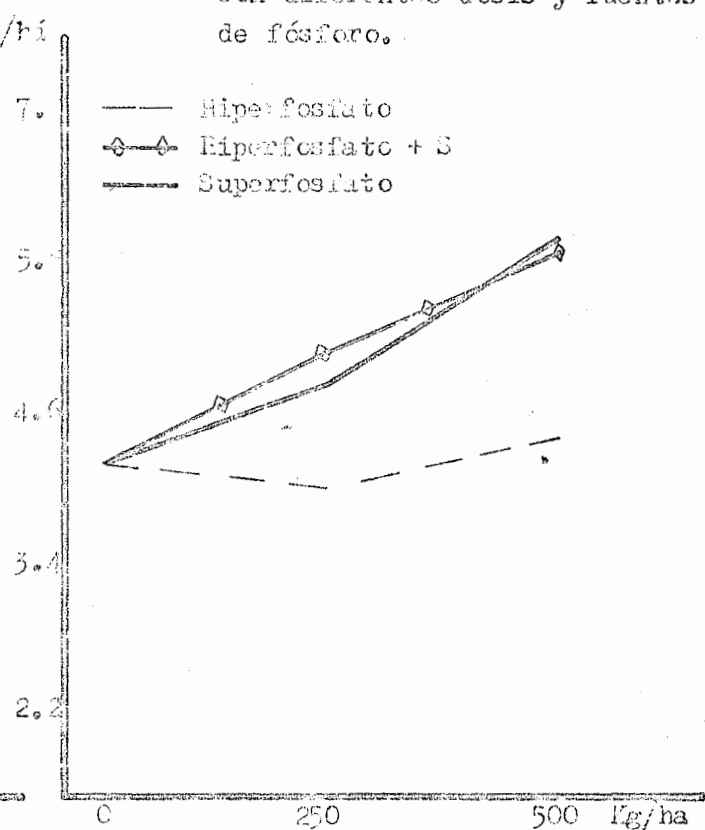


Figura 4. Segundo corte. Fósforo absorbido calculado sobre materia seca total (trébol blanco + maleza) con diferentes dosis y fuentes de fósforo.

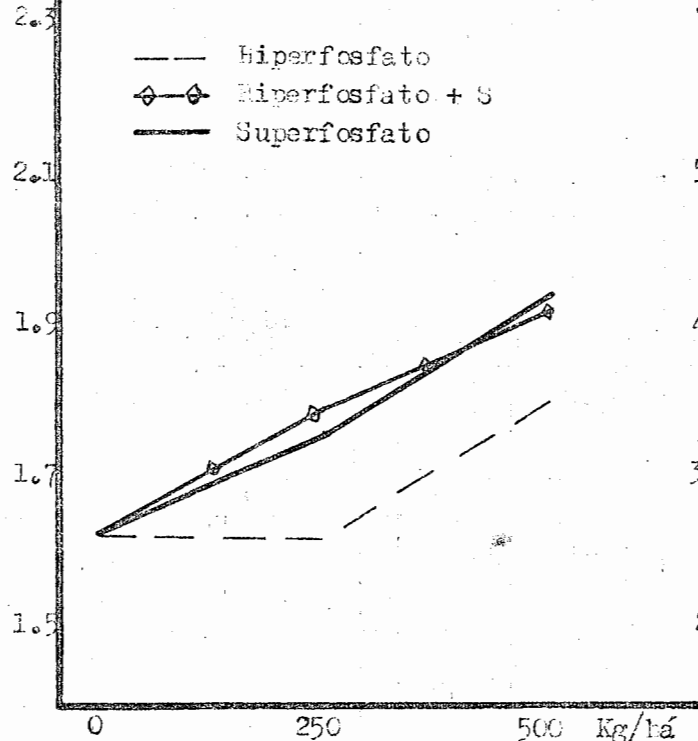


Figura 5. Producción de materia seca (trébol blanco + maleza) con diferentes dosis y fuentes de fósforo. Tercer corte.

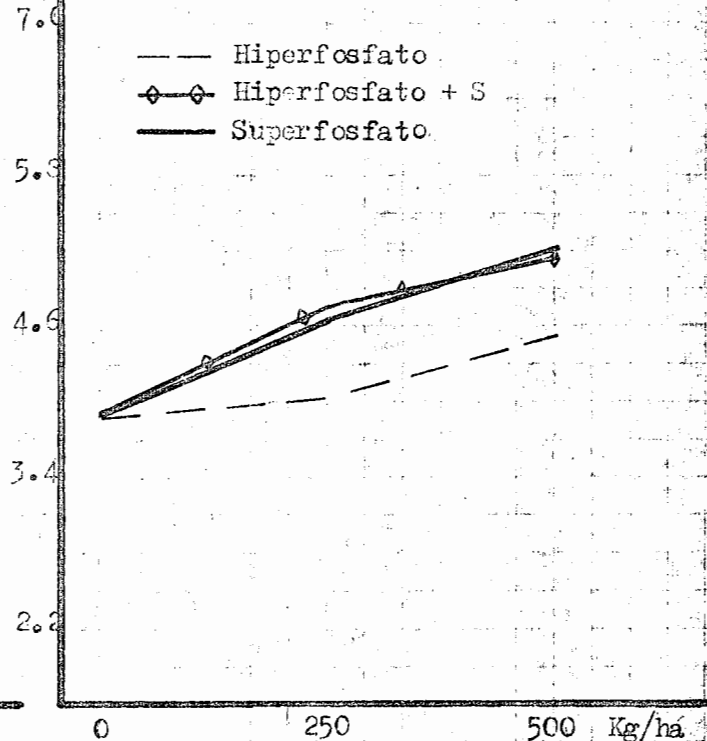


Figura 6. Fósforo absorbido calculado sobre materia seca total (trébol blanco + maleza) con diferentes dosis y fuentes de fósforo. Tercer corte.

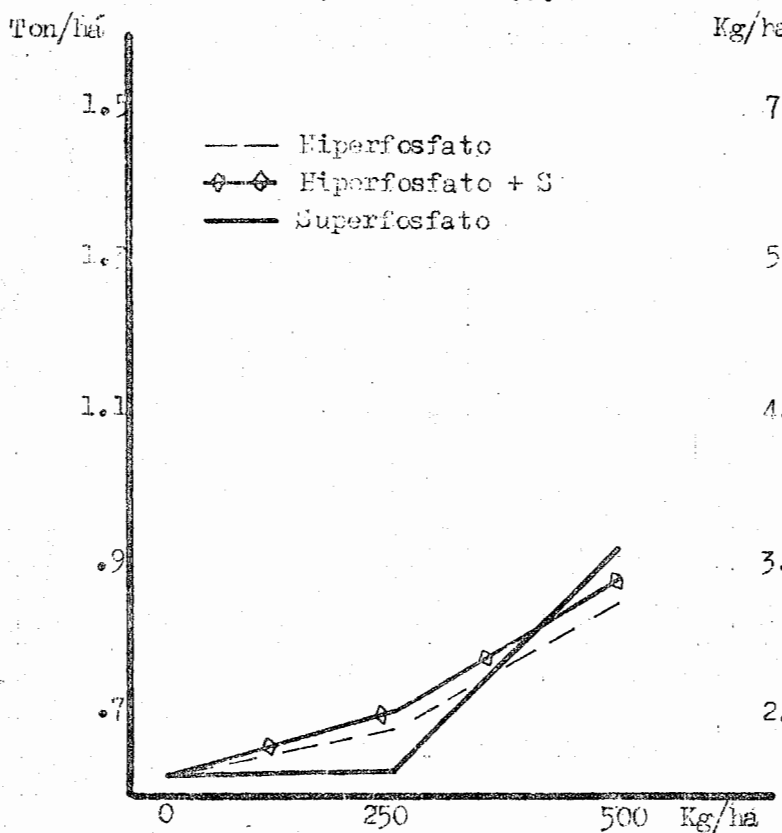


Figura 7. Producción de materia seca (trébol blanco + maleza) con diferente dosis y fuente de fósforo. Cuarto corte.

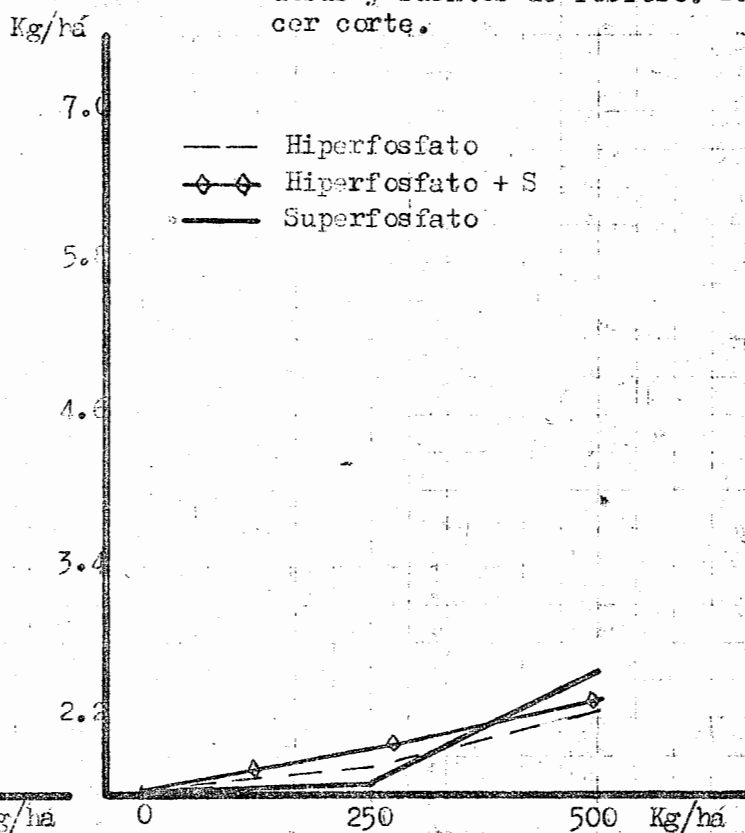


Figura 8. Fósforo absorbido calculado sobre materia seca total (trébol blanco + maleza) con diferentes dosis y fuentes de fósforo. Cuarto corte.

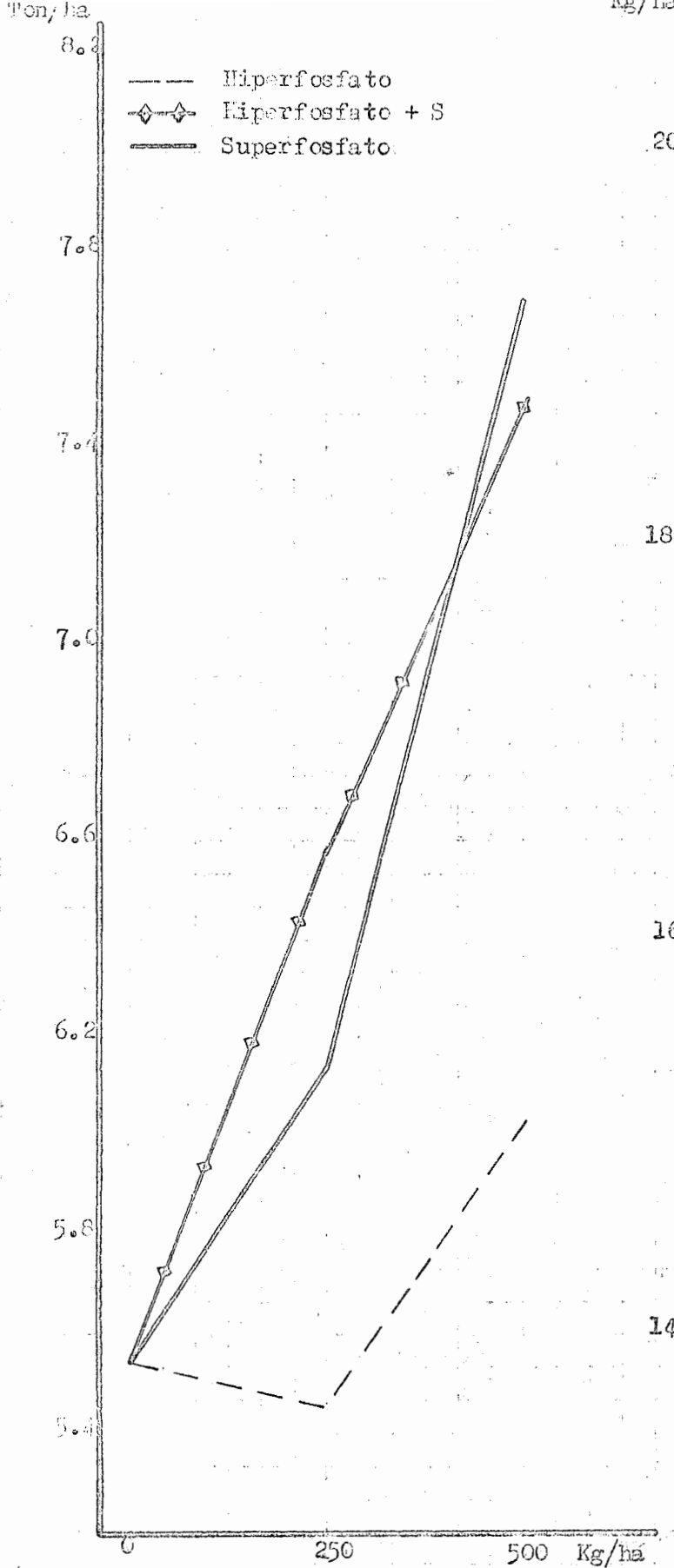


Figura 9. Producción de materia seca total (trébol blanco + maleza) de los cuatro cortes acumulados con diferentes dosis y fuentes de fósforo.

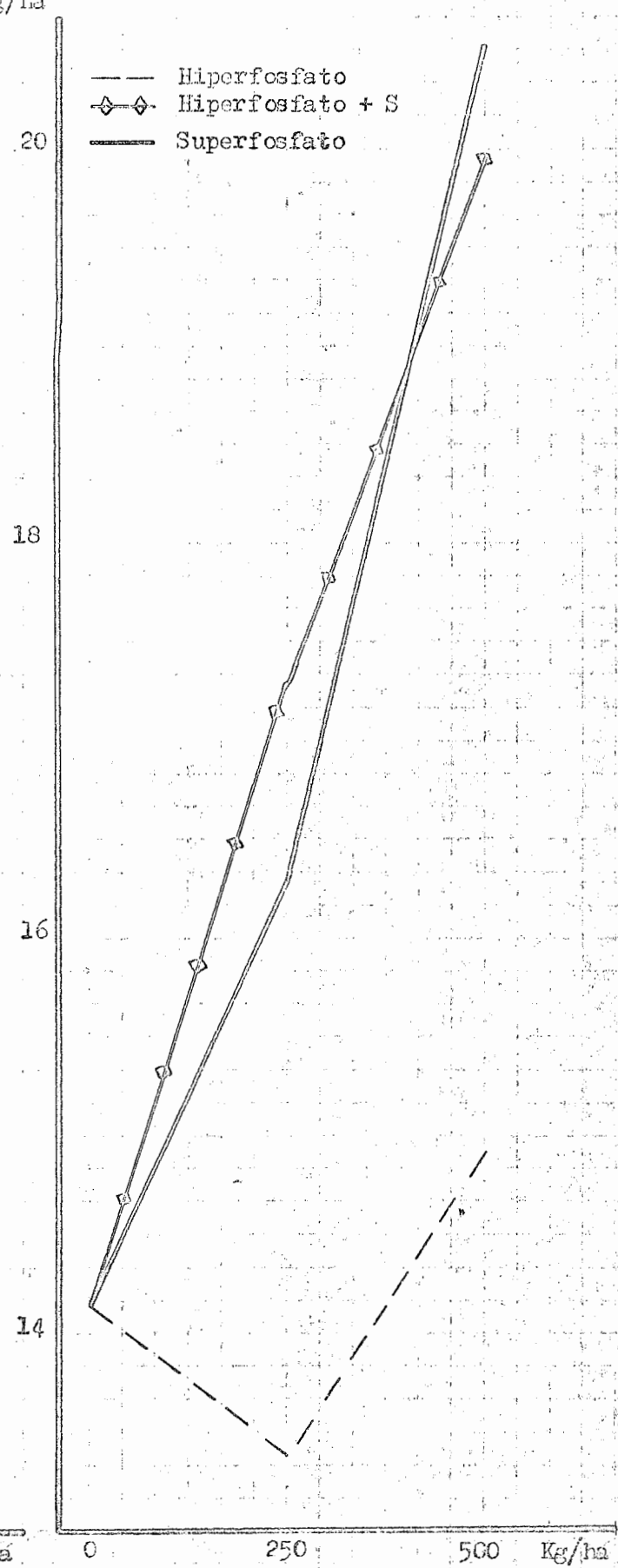


Figura 10. Fósforo absorbido calculado sobre materia seca total (trébol blanco + maleza) de los cuatro cortes acumulados con diferentes dosis y fuentes de fósforo.

El análisis estadístico de los datos de producción de materia seca y fósforo absorbido (Apéndice 2a y 2b respectivamente), nos muestra que existen diferencias altamente significativas entre fuentes y cortes, así como interacción entre estos. En el Cuadro No. 4 se presentan los datos promedios de producción de materia seca para cada fuente en los dos niveles utilizados.

Cuadro No. 4. Producción de materia seca (trébol blanco + maleza) en kg/ha con diferentes fuentes. En cada columna, los valores acompañados por la misma letra no difieren significativamente (5%), donde n_1 y n_2 son el número de observaciones de los tratamientos a comparar.

Cortes	1er	2o.	3er	4to	Σ 4 cortes
Mezcla hiperfosfato-azufre	2.207 ^a	2.176 ^a	1.859 ^a	801 ^a	7.093 ^a
Superfosfato	2.182 ^a	2.141 ^a	1.841 ^a	768 ^{ab}	6.933 ^a
Hiperfosfato	1.446 ^b	1.802 ^b	1.713 ^a	774 ^{ab}	5.735 ^b
Testigo	1.646 ^{ab}	1.904 ^{ab}	1.633 ^a	626 ^b	5.809 ^b
L.S.D. (0.05)($n_1=3, n_2=3$)	460	322	203	137	809
L.S.D. (0.05)($n_1=4, n_2=3$)	563	394	255	167	991

La mezcla hiperfosfato-azufre no se diferencia significativamente (5%) del superfosfato, mientras que estos son diferentes del hiperfosfato, sólo en los dos primeros cortes. En los cortes individuales, la única fuente que supera significativamente al testigo es la mezcla en el cuarto corte. En los datos de los cuatro cortes acumulados, la mezcla presenta valores similares a los de superfosfato, mientras que estas fuentes son superiores al hiperfosfato y al testigo, no habiendo diferencias entre estos últimos. Los datos de fósforo absorbido para las diferentes fuentes se presentan en el Cuadro No. 5.

Cuadro No. 5. Fósforo absorbido (kg/bá) calculado sobre materia seca total, con diferentes fuentes. Los datos son promedios de los niveles utilizados. En cada columna los valores acompañados por la misma letra no difieren significativamente (5%), donde n_1 y n_2 son el número de observaciones de los tratamientos a comparar.

Cortes	1er	2do	3er	4to	Σ 4 cortes
Mezcla hiperfosfato-azufre	6.06 ^a	5.51 ^a	4.95 ^a	2.21 ^a	18.73 ^a
Superfosfato	5.85 ^a	5.42 ^{ac}	4.95 ^a	2.16 ^a	18.38 ^a
Hiperfosfato	3.54 ^b	4.25 ^b	4.29 ^{ab}	2.04 ^{ab}	14.12 ^b
Testigo	4.40 ^{ba}	4.25 ^{bc}	3.90 ^b	1.62 ^b	14.17 ^b
L.S.D. (0.05)($n_1=8, n_2=8$)	1.42	.98	.76	.39	2.31
L.S.D. (0.05)($n_1=4, n_2=8$)	1.74	1.20	.93	.48	2.83

Observamos que la mezcla presenta valores similares al superfosfato en todos los cortes, mientras que estas fuentes son significativamente superiores al hiperfosfato, sólo en los dos primeros cortes. El testigo es únicamente superado por las dos mejores fuentes en los últimos cortes. Los datos acumulados de los cuatro cortes nos indican como superiores, y sin diferencias entre ellos a la mezcla y al superfosfato.

En resumen, observamos que la mezcla se comporta en forma similar al superfosfato, ya sea considerando producción de materia seca o fósforo absorbido. Por el contrario, el hiperfosfato se presenta como inferior a estas fuentes en los dos primeros cortes y en los datos acumulados en todo el período, sin llegar a diferenciarse en ningún caso del testigo.

Con los datos de producción de materia seca y fósforo absorbido de los cuatro cortes acumulados, se ajustaron curvas de regresión lineal. Mediante el análisis de heterogeneidad de estas ecuaciones se constató que no existían diferencias significativas entre las de superfosfato y mezcla hiperfosfato-azufre, mientras que la de hiperfosfato era diferente. Estas ecuaciones así como la utilizada para las dos mejores fuentes conjuntamente se presentan a continuación.

Fuente		r^2	Límites de confianza (n)
Superfosfato	$Y_1 = 5.612,8 + 3,78X_1$	.88	*
Mezcla hiperfosfato-S	$Y_1 = 5.784,8 + 3,39X_1$	.99	**
Total de datos (superfosfato-mezcla)	$Y_1 = 5.619,8 + 3,77X_1$	.95	***
Superfosfato	$Y_2 = 13,84 + .0125X_1$	.96	+
Mezcla hiperfosfato-S	$Y_2 = 14,36 + .0114X_1$	.99	++
Total de datos (superfosfato-mezcla)	$Y_2 = 14,04 + .0121X_1$	.99	+++

* - **

$$2,11 \quad 587.940 \quad \frac{1}{10} + \frac{(375 - X_1)^2}{700.000}$$

$$2,11 \quad 587.940 \quad \frac{1}{20} + \frac{(375 - X_1)^2}{700.000}$$

+ - ++

$$2,11 \quad 4,7932 \quad \frac{1}{10} + \frac{(375 - X_1)^2}{700.000}$$

+++

$$2,11 \quad 4,7932 \quad \frac{1}{20} + \frac{(375 - X_1)^2}{700.000}$$

Donde X_1 son los kg/há de fertilizantes agregados, Y_1 e Y_2 rendimiento en kg/há de materia seca y fósforo absorbido, respectivamente.

En el análisis de variancia de los datos de producción de materia seca y fósforo absorbido para hiperfosfato (Apéndice 2d y 2f respectivamente), observamos que no hay diferencias para los niveles utilizados, lo que implica que el coeficiente de la regresión no es, estadísticamente, diferente de cero. Por lo anterior, no se ajustaron curvas de regresión para esta fuente.

Incubación

Durante un período, la determinación de sulfatos se realizó por los métodos citados. Del análisis de estos datos se estimó que la utilización del método de Resinas Catiónicas daría una mejor determinación de sulfatos pues se obtienen valores mayores, encontrándose además, una correlación entre los valores obtenidos por los dos métodos de 0.86 (altamente significativa). La utilización de este método, conjuntamente con el análisis de fósforo disponible por Resinas Catiónicas disminuye las operaciones necesarias por lo que se adecuaría mejor al análisis de rutinas. Por lo antes expuesto, se consideraran únicamente los datos obtenidos por el método de Resinas Catiónicas.

Todos los análisis se realizaron por duplicado, encontrándose valores muy similares. Los datos presentados son el promedio de estos valores.

Pradera Parca

El fósforo disponible determinado por el método Bray y Kurtz No 1 (Figura 11), presenta diferencias de acuerdo a la fuente utilizada. Los tratamientos de mezcla Fosforita de Florida del Norte-azufre, fusión hiperfosfato-azufre, fusión Fosforita de Florida del Norte-azufre y el testigo son sensiblemente inferiores a los restantes, notándose un leve aumento en los tres primeros, lo cual tendería a eliminar estas diferencias. El testigo se mantiene constantemente inferior. Si el fósforo disponible es medido por el método de Resinas Catiónicas, las diferencias entre estos tratamientos es mínima, manteniéndose sólo la diferencia con el testigo (Figura 12). Todos los tratamientos, con excepción de hiperfosfato, muestran un contenido mayor de SO_4 que el testigo (Figura 13). Este contenido experimenta un leve ascenso durante el período en que se realizó la incubación acentuándose en los tratamientos de Fosforita de Florida del Norte y mezcla hiperfosfato-azufre.

Planosol

Si consideramos el fósforo disponible determinado por el método Bray y Kurtz No 1, los tratamientos de fusión hiperfosfato-azufre y fusión Fosforita de Florida del Norte-azufre son levemente superiores al testigo, mientras que el de mezcla Fosforita de Florida del Norte-azufre no tiene en el comienzo del período diferencias con el testigo pero luego

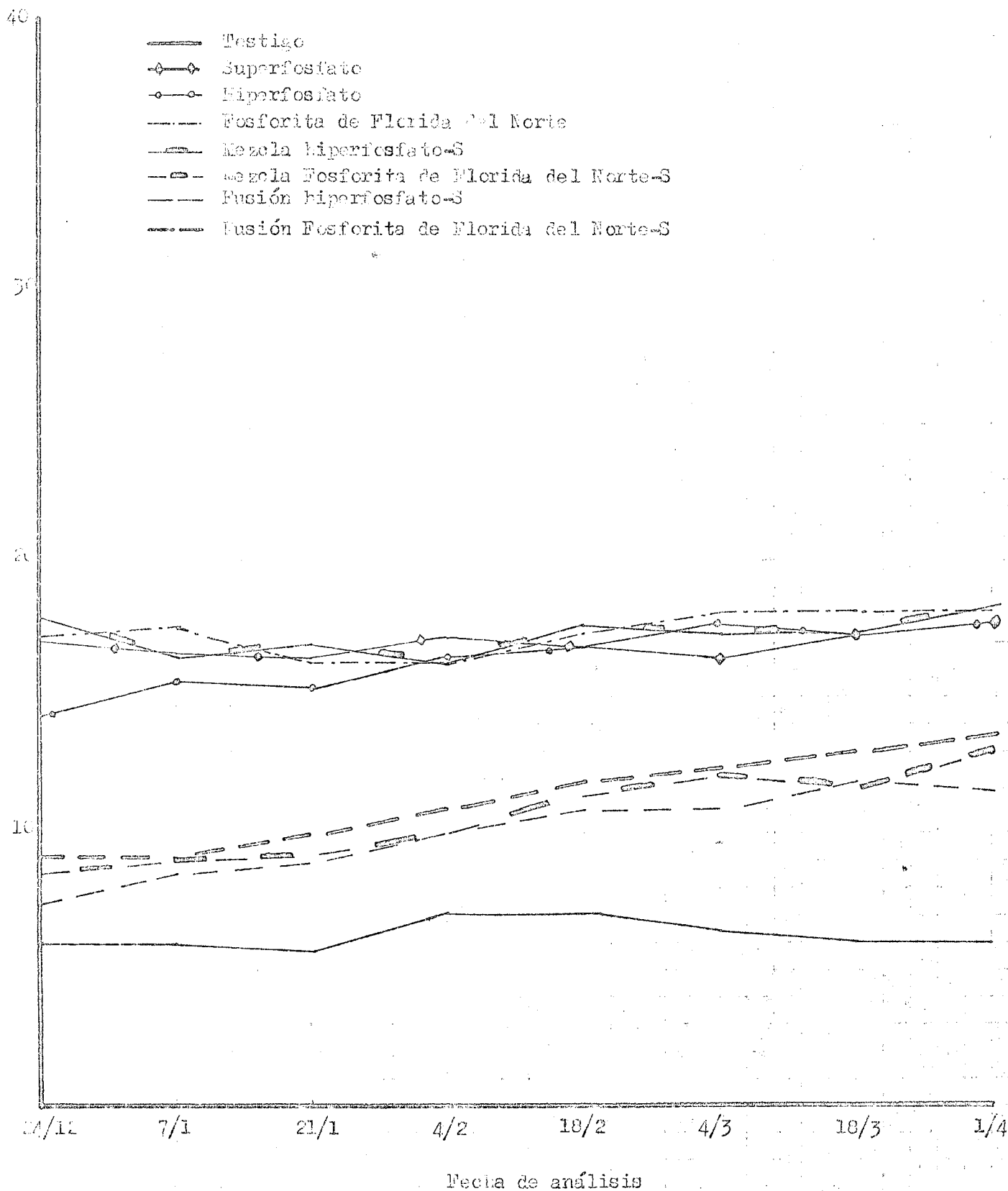


Figura 11. Pradera Parda. Evolución del contenido de fósforo disponible durante la incubación, determinado por el método de Bray y Kurtz Nº1.

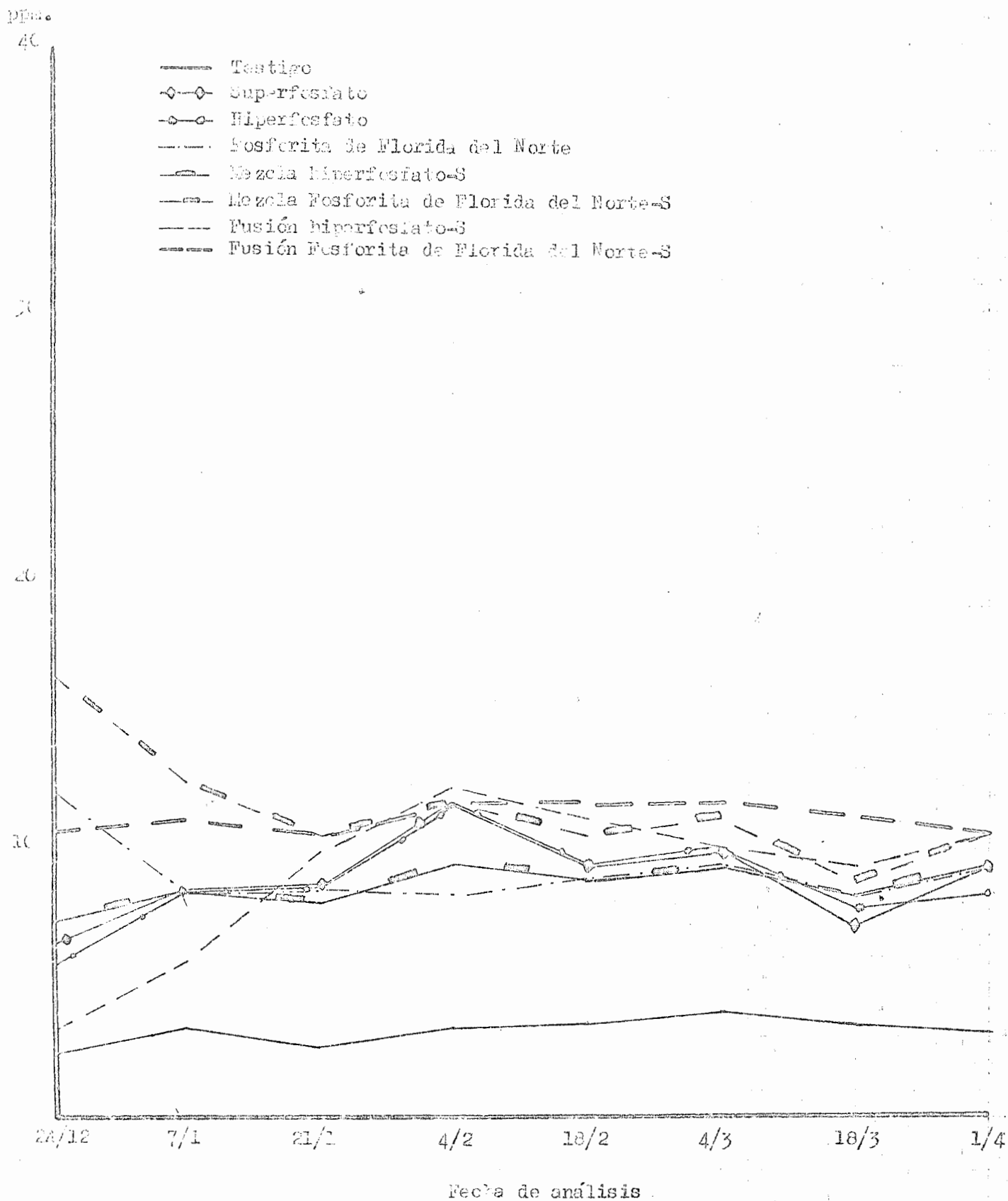


Figura 12. Tradera Parda. Evolución del contenido de fósforo disponible durante la incubación, determinado por el método de Resinas Catiónicas.

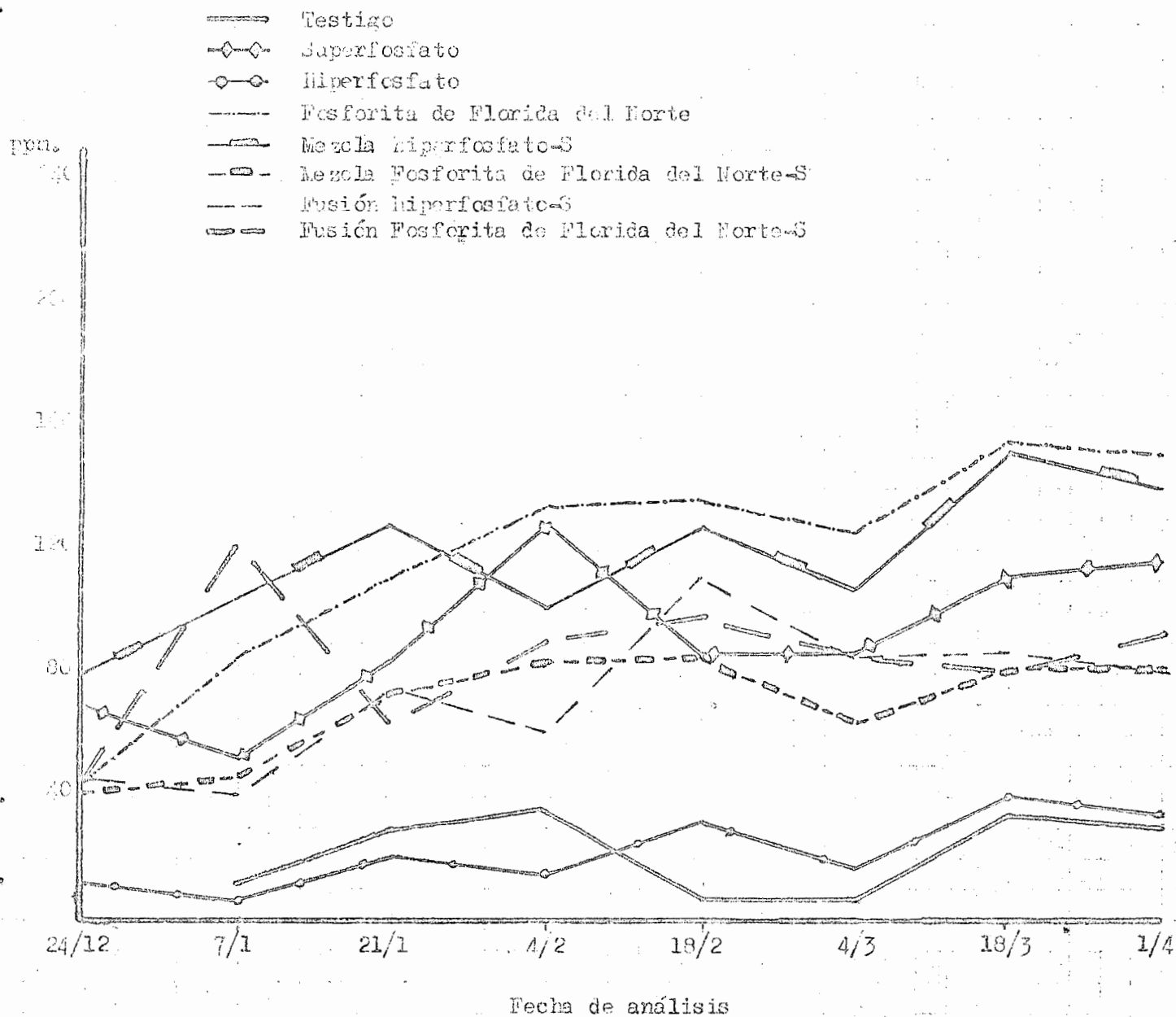


Figura 13. Pradera Parda. Evolución del contenido de SO_4 durante la incubación, determinados por el método de Resinas Cationicas.

decreciendo dando valores aún inferiores a este. Los restantes tratamientos presentan valores superiores en todo el período (Figura 14). La Figura 15 nos muestra los resultados del análisis por el método de Resinas Catiónicas. Todos los tratamientos presentan durante el período un moderado ascenso. Se da una constante diferencia del testigo con los demás tratamientos, destacándose, al final del período, los de fusión hiperfosfato-azufre y fusión de Fosforita de Florida del Norte-azufre. Mientras que el tratamiento de mezcla hiperfosfato-azufre se destaca en el contenido de SO_4 de los últimos muestras, los de Fosforita de Florida del Norte y fusión hiperfosfato-azufre sufren un leve ascenso en este período (Figura 16).

Pradera Arenosa

Las Figuras 17 y 18 muestran la evolución del fósforo disponible obtenido con la utilización de los métodos Bray y Kurtz No 1 y Resinas Catiónicas respectivamente. En los dos casos se producen diferencias de los restantes tratamientos con el testigo. En el primer método, al igual que en el caso de la Pradera Parda, los contenidos intermedios se dan en los tratamientos de mezcla Fosforita de Florida del Norte-azufre, fusión hiperfosfato-azufre y fusión Fosforita de Florida del Norte-azufre. Cuando se utiliza el método de Resinas Catiónicas, las diferencias son menores, siendo éstos los tratamientos que dan mayores valores de fósforo disponible. El testigo presenta valores netamente inferiores. Se nota un

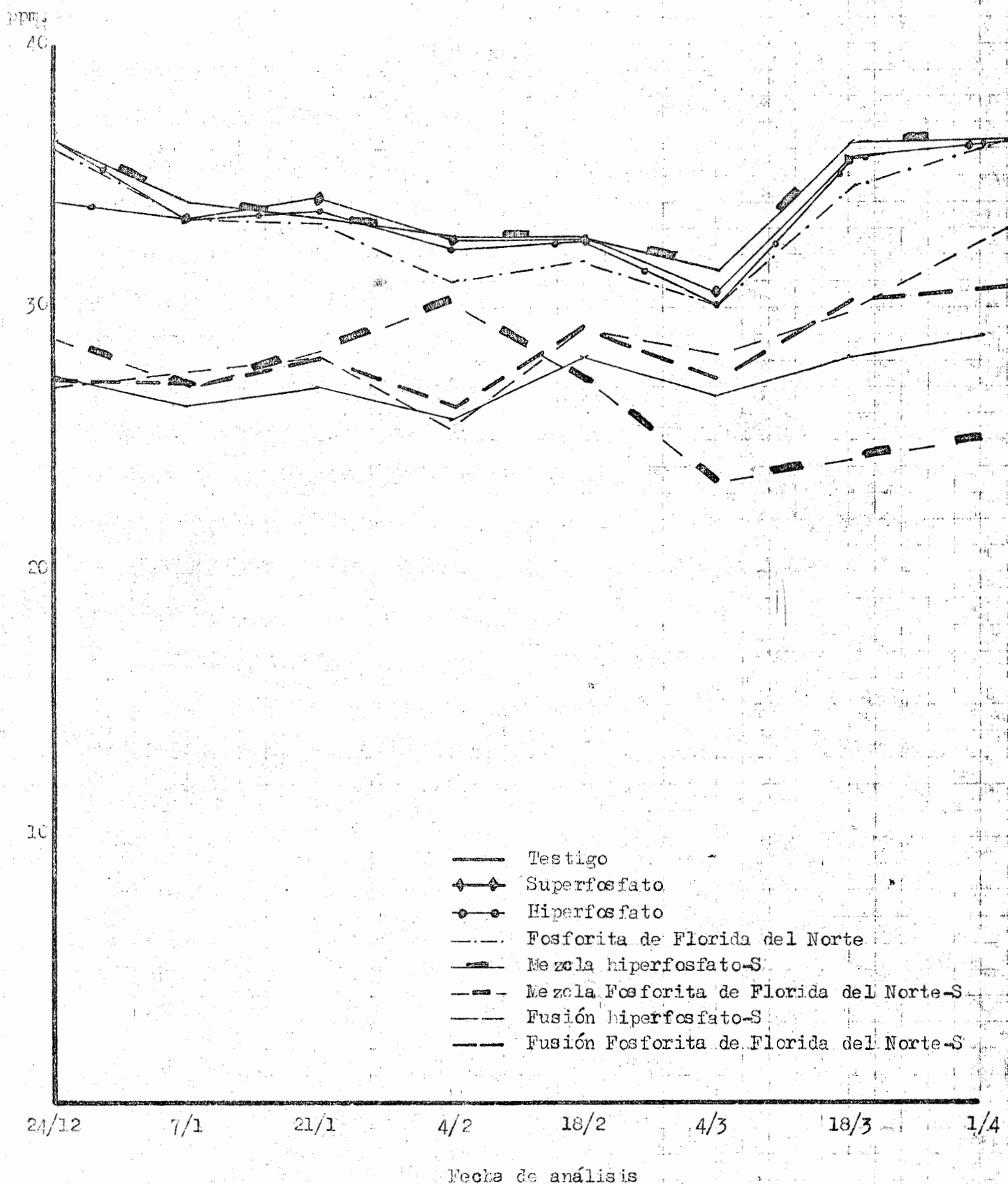


Figura 14. Planosol. Evolución del contenido de fósforo disponible durante la incubación, determinado por el método Bray y Kurtz N°1.

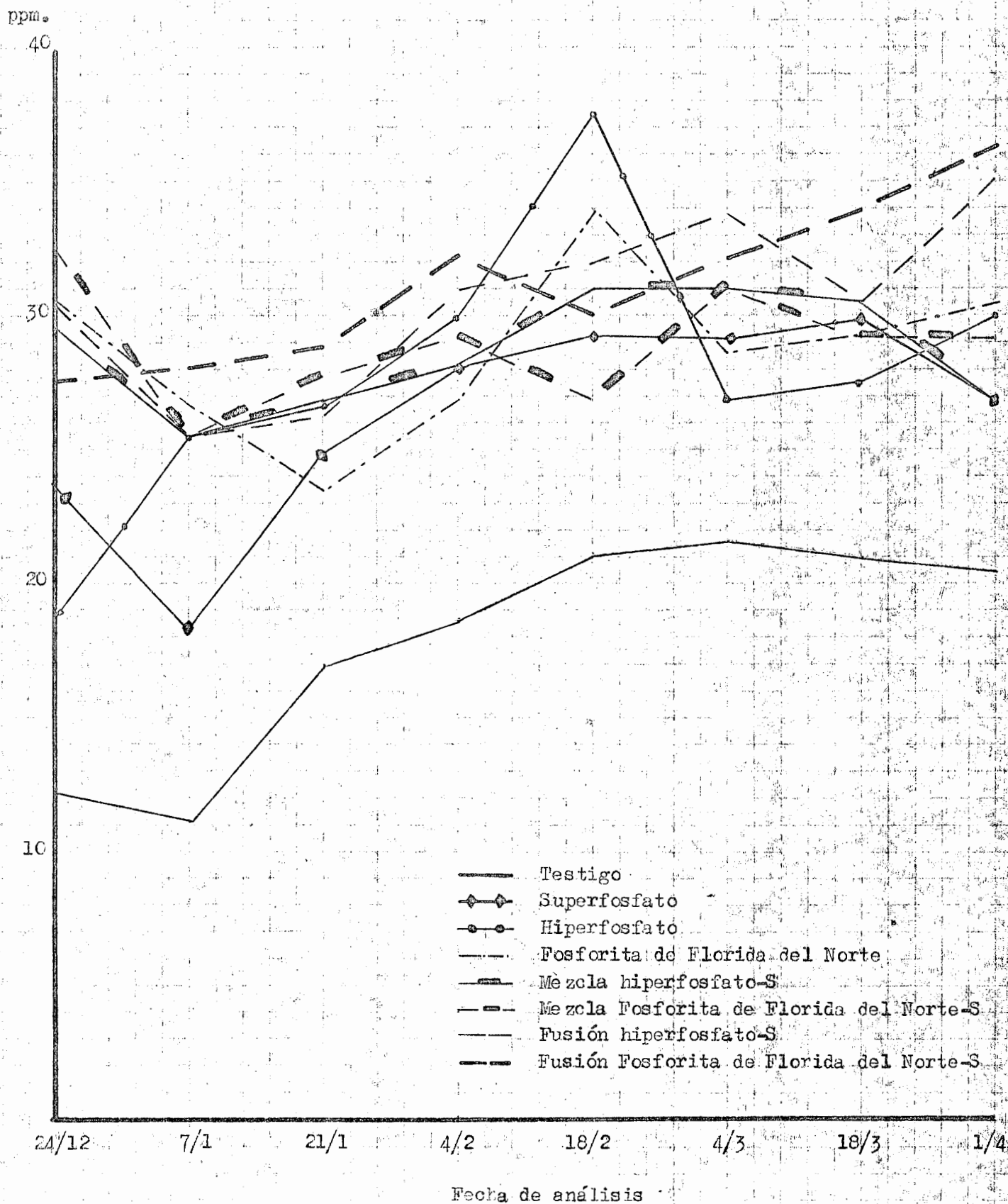


Figura 15. Planosol. Evolución del contenido de fósforo disponible durante la incubación, determinado por el método de Resinas Cationicas.

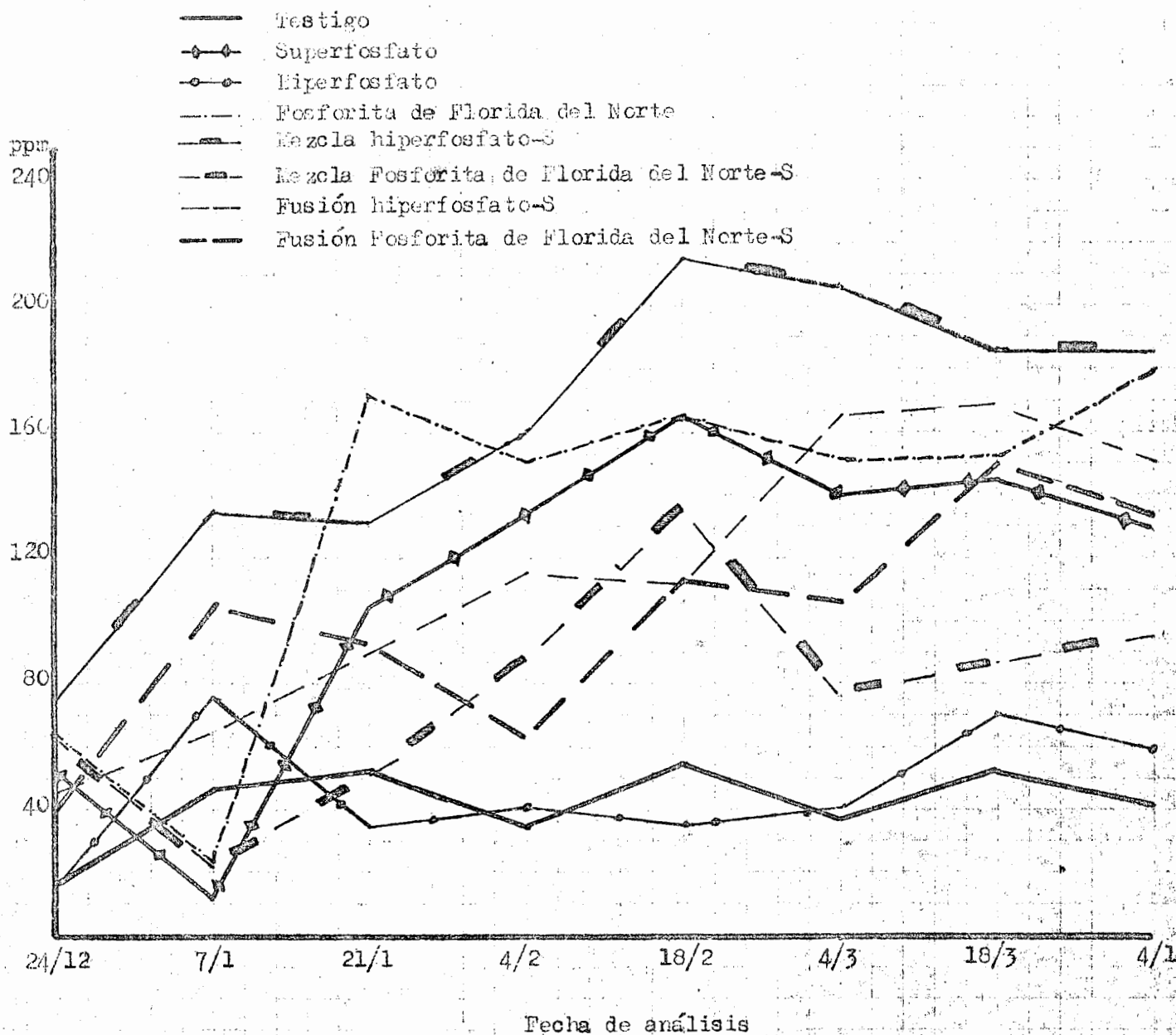


Figura 16. Planosol. Evolución del contenido de SO_4 durante la incubación, determinados por el método de Resinas Catiónicas.

- Control
- Superfosfato
- Trifosfato
- Fosforita de Florida del Norte
- Mezcla hiperfosfato-S
- Mezcla Fosforita de Florida del Norte-S
- Fusión hiperfosfato-S
- Fusión Fosforita de Florida del Norte-S

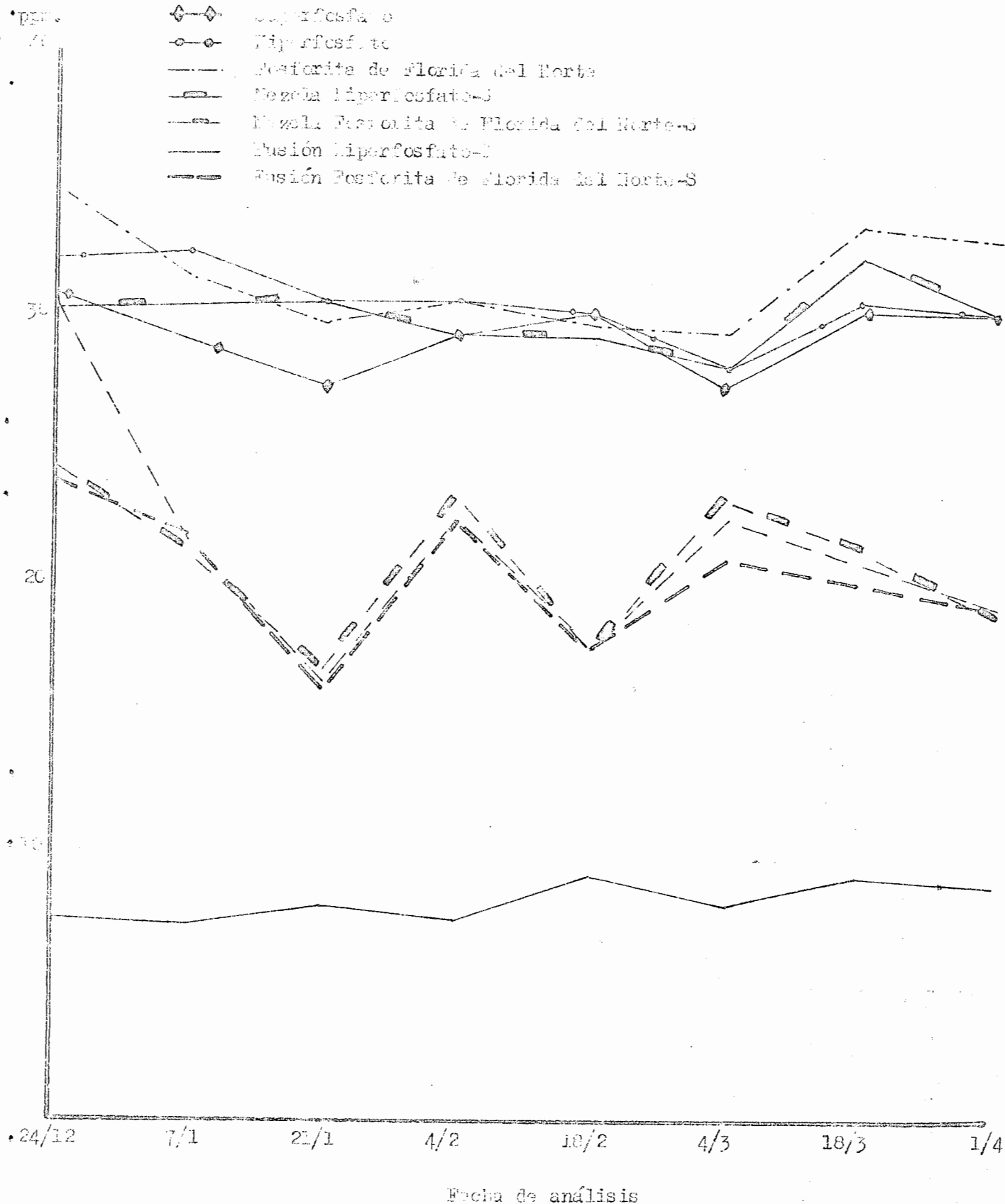


Figura 17. Pradera Arenosa. Evolución del contenido de fósforo disponible durante la incubación, determinado por el método Bray y Kurtz N°1

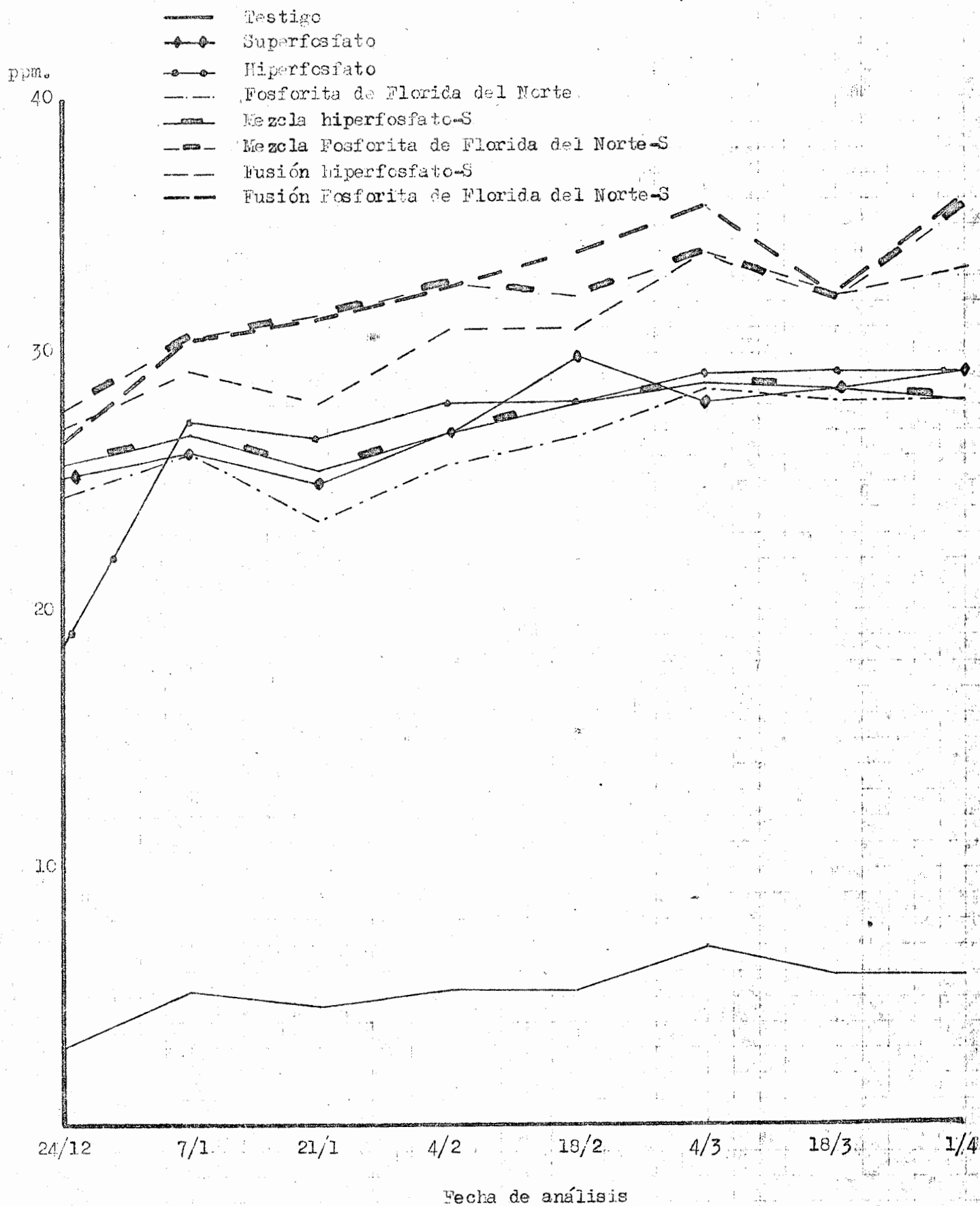


Figura 18. Pradera Arenosa. Evolución del contenido de fósforo disponible durante la incubación, determinado por el método de Resinas Catiónicas.

leve ascenso durante el período de incubación. En el contenido de SO_4 no se dan diferencias entre el testigo, hiperfosfato y mezcla Fosforita de Florida del Norte-azufre, mientras que los restantes tratamientos tienen valores superiores destacándose, al final del período, el tratamiento de mezcla de hiperfosfato-azufre (Figura 19).

Gramosol

Utilizando el método de Bray y Kurtz No 1, se observan importantes diferencias del superfosfato con los restantes tratamientos, los cuales presentan valores similares (Figura 20). Durante todo el período, los valores se mantienen prácticamente constantes. Con el método de Resinas Catiónicas (Figura 21), se obtienen importantes diferencias con el testigo, el cual es netamente inferior. Los tratamientos de mezcla Fosforita de Florida del Norte-azufre y fusión hiperfosfato-azufre, tienen cierta diferencia con los restantes en los primeros muestreos, pero ésta desaparece al final del período. Esto se debe a un pequeño descenso de éstos acompañado de un leve ascenso de los restantes tratamientos. El contenido de SO_4 (Figura 22) nos muestra que los tratamientos testigo, hiperfosfato y mezcla Fosforita de Florida del Norte-azufre son muy similares en esta característica, mientras que los de Fosforita de Florida del Norte y mezcla hiperfosfato-azufre se presentan algo superiores en gran parte del período estudiado.

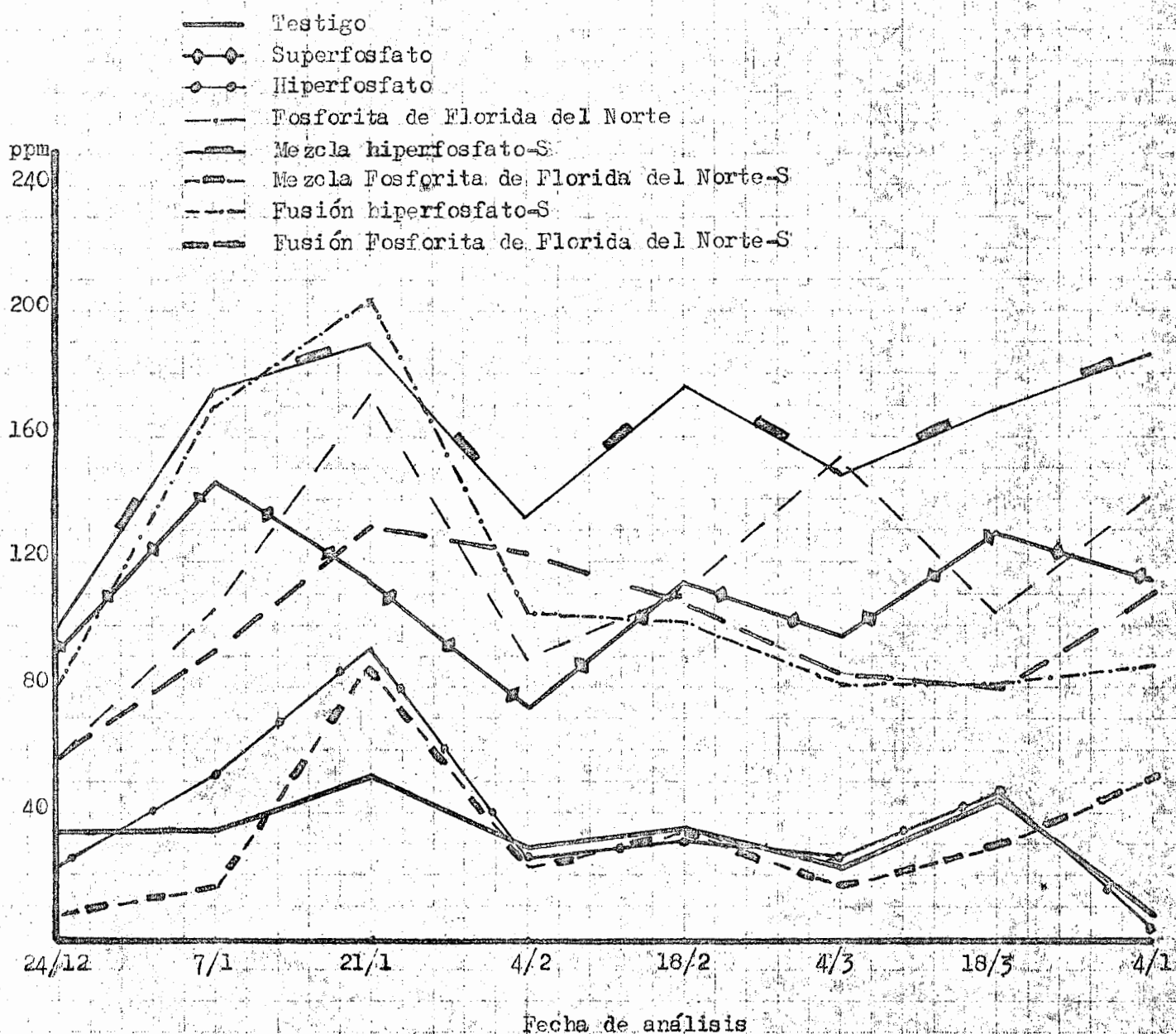


Figura 19. Pradera Arenosa. Evolución del contenido de SO_4 durante la incubación, determinados por el método de Resinas Catiónicas.

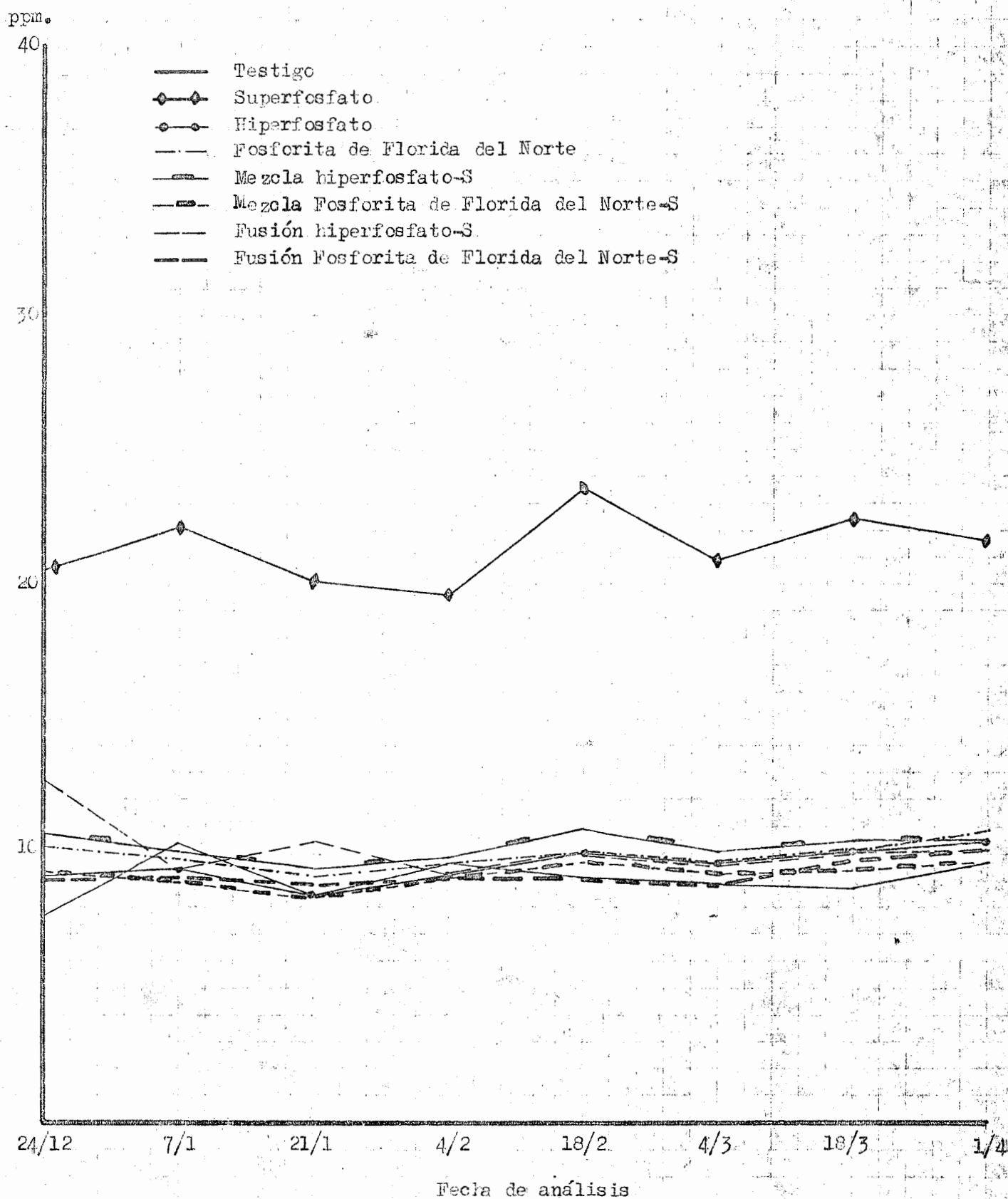


Figura 20. Grumosol. Evolución del contenido de fósforo disponible durante la incubación, determinado por el método de Bray y Kurtz N°1.

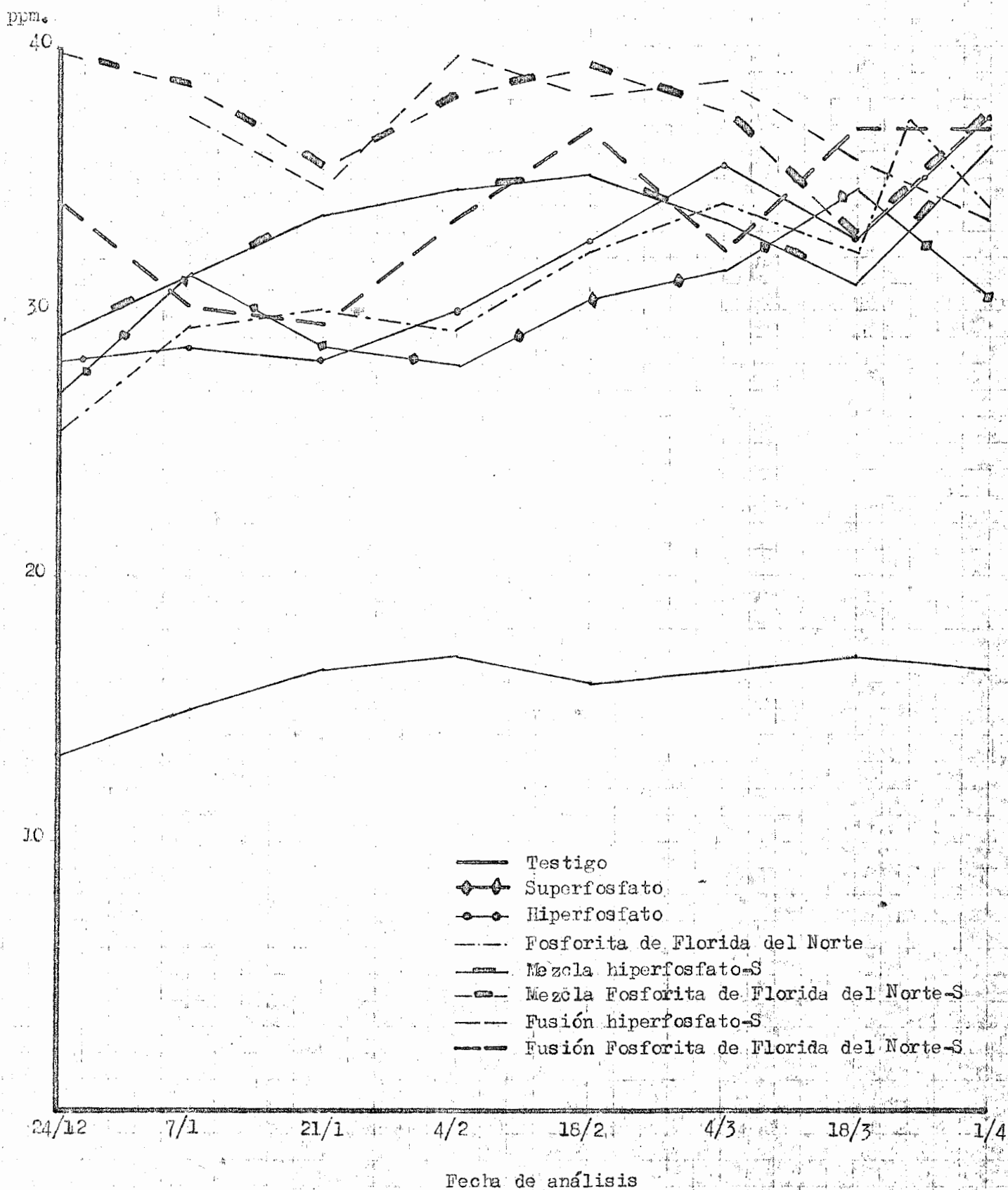


Figura 21. Grumosol. Evolución del contenido de fósforo disponible durante la incubación, determinado por el método de Resinas Cationicas.

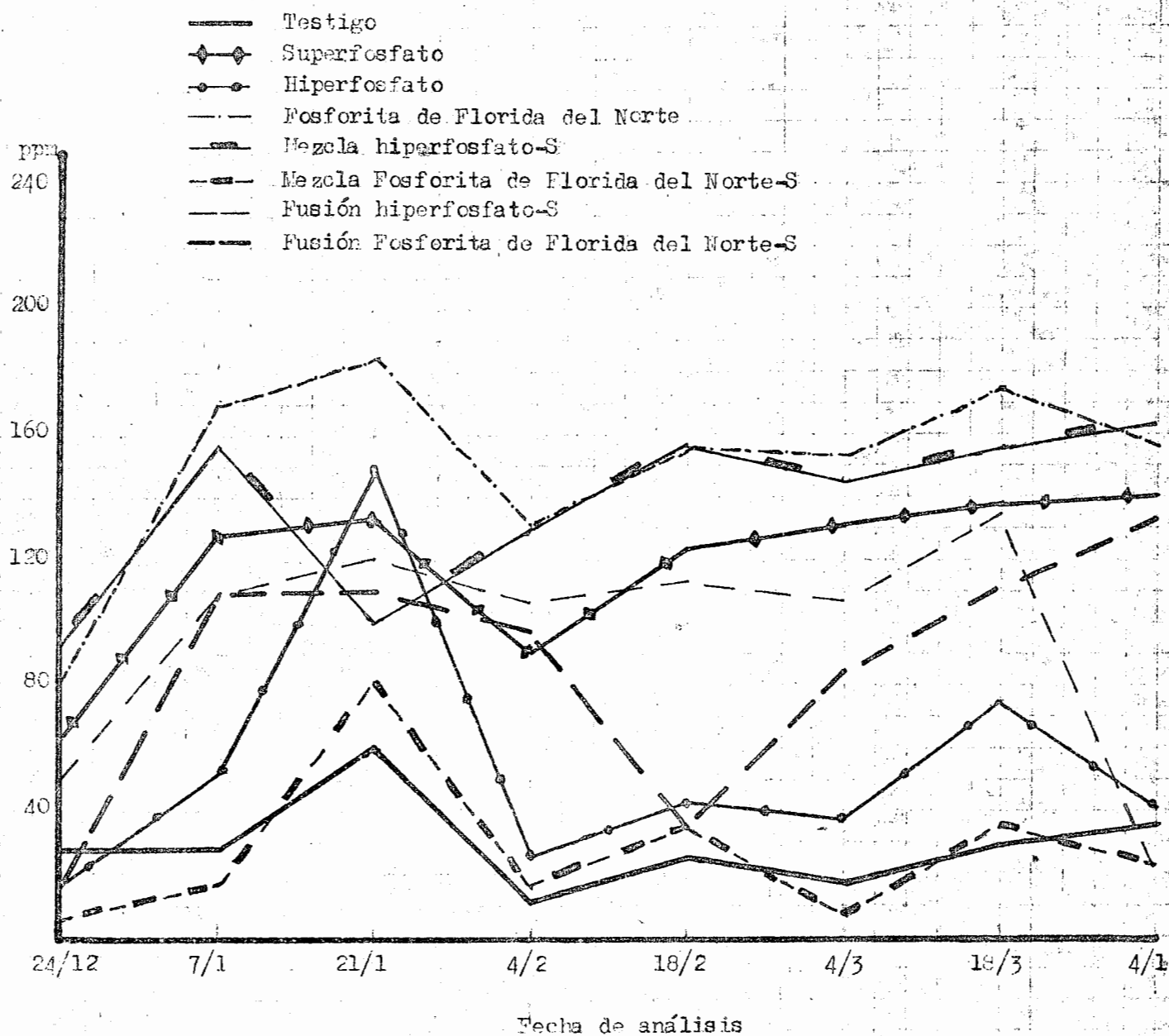


Figura 22. Grumosol. Evolución del contenido de SO_4 durante la incubación, determinado por el método de Resinas Cationicas.

CONCLUSIONES

Si bien los datos del ensayo de campo presentados por ser del primer año no permiten obtener conclusiones definitivas, se pueden extraer de ellos ideas primarias del comportamiento de la mezcla hiperfosfato-azufre como fuente de fósforo a corto y mediano plazo. Se observa que la mezcla supera al superfosfato en producción de materia seca o fósforo absorbido en la dosis de 250 kg/há y es levemente inferior a éste en la dosis de 500 kg/há, no siendo en ningún caso las diferencias significativas entre estos fertilizantes.

Esto, conjuntamente con la superioridad presentada por la mezcla hiperfosfato-azufre frente al hiperfosfato, en los datos de los cuatro cortes acumulados, nos permite pensar en una buena solubilización de la fosforita cuando es aplicada con azufre elemental en suelos con adecuada población de microorganismos oxidantes de azufre. Esto es corroborado por trabajos realizados por Novella (comunicación personal) en el Centro de Investigaciones Agrícolas "Alberto Boerger", en los cuales determinó mediante acidez titulable y pH de suelos incubados con azufre elemental que el utilizado en el presente trabajo tiene una moderada capacidad oxidante y que Thiobacillus thiooxidans es común en él.

Los datos provenientes de la incubación no permiten extraer conclusiones del comportamiento de los tratamientos comparados pues los métodos de análisis utilizados resultaron inadecuados en las condiciones en que se trabajó para detectar diferencias entre las fuentes de fósforo utilizadas.

Si bien se requieren un mayor número de datos en diferentes condiciones y tipos de suelos para obtener conclusiones definitivas, el método de Resinas Catiónicas se presenta como adecuado para la determinación de sulfatos. Cuando conjuntamente se determine fósforo disponible por el método de Resinas Catiónicas, las operaciones necesarias disminuyen notablemente presentándose muy conveniente en análisis de rutina.

Si los datos presentados son corroborados por la continuación de este ensayo y por otros similares instalados en diferentes tipos de suelos del país, el agregado de azufre a fosforitas sin tratamiento químico se presenta como una alternativa en la utilización de fuentes de fósforo a aplicar en praderas. Sin duda, que la ventaja de la utilización de esta fuente como sustituto o complemento del superfosfato o hiperfosfato (en los suelos en que está probado su buen comportamiento), estará dada por la relación de precios con éstos.

Queda por evaluar la eficiencia de esta fuente en cultivos anuales, por lo que se sugiere, además de la continuación del presente trabajo e inclusión de diferentes suelos, la realización de ensayos en este tipo de cultivos.

BIBLIOGRAPHIA CITADA

1. Alexander, M. 1961. Microbial transformation of sulfur. In Introduction to soil microbiology. New York. John Willey & Sons (ed.). pp. 370-386.
2. Ashby, D. L., Fenster, W. E., and Attee, O. J. 1966. Effect of partial acidulation and elemental sulfur on availability of phosphorus in rock phosphate. Agronomic Journal 58:621-625.
3. Attee, O. J. and Olson, E. A. 1966. Factors affecting rate of oxidation in soils of elemental sulfur and that added in rock phosphate-sulfur fusions. Soil Science 101(4):317-325.
4. Bardsley, C. E. and Lancaster, J. D. 1965. Sulfur. In Methods of soil analysis. Black C. A. (ed.). Madison, Wisconsin. American Society of Agronomy. pp. 1102-1116.
5. Bertramson, B. R., Fried, M. and Tisdale, S. L. 1950. Sulfur studies of Indiana soils and crops. Soil Science 70(1):27-41.
6. Blair, G. J. 1971. The sulphur cycle. Journal of the Australian Institute of Agricultural Science 37(2): 113-121.
7. Bray, R. H. and Kurtz, L. T. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphate in soil. Soil Science 59:39-45.
8. Doak, R. W., Callahan, P. J., Evans, L. and Muller, F. B. 1965. Low temperature calcination of "C" grade phosphate from Christmas Island. New Zealand Journal of Agricultural Research 8:15.
9. Fisher, M. J. and Norman, M. J. 1970. Tests of phosphates from Rom Jungle, Northern Territory. Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry 10(46):592-598.

10. Hatfield, J. D. 1964. Normal superphosphate: chemistry. In United States Department of Agriculture and Tennessee Valley Authority. Superphosphate: Its history, chemistry, and manufacture. Washington United States Department of Agriculture. pp. 116-130.
11. Hutton, R. G. and Rye, F. H. 1958. The rapid determination of the major nutrient elements in plants. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 9(1):7-14.
12. Kitson, R. E. y Mellon, M. G. 1944. Colorimetric determination of phosphorus as Molybdovanado phosphoric Acid. *Ind. Eng. Chem. (Anal.)* 16:379-383.
13. Kittens, H. A., and Attie, O. J. 1965. Availability of phosphorus in rock phosphate-sulfur fusions. *Agronomy Journal* 57(4):331-334.
14. Moser, U. S. and Olson, R. V. 1953. Sulfur oxidation in four soils as influenced by moisture tension and bacteria. *Soil Science* 76(4):251-257.
15. Neller, J. H. 1956. Effect of sulfur and gypsum additions on availability of rock phosphate phosphorus on Leon Fine Sand. *Soil Science* 82(2):129-134.
16. Starkey, R. L. 1950. Relation of microorganisms to transformation of sulfur in soils. *Soil Science* 70(1):55-67.
17. ———, 1966. Oxidation and reduction of sulfur compound in soils. *Soil Science* 101(4):297-306.
18. Vishniac, W. and Santer, M. 1957. The thiobacilli. *Bact. Rev.* 21(3):199-213.
19. Vitelins, M. I. and Swaby, R. J. 1969. Activity of sulfur-oxidizing microorganisms in some Australian soils. *Australian Journal of Soil Research* 7(2):171-183.
20. Waskman, S. A. 1963. Occurrence of specific microorganisms in the soil. In *Soil Microbiology*. New York, John Wiley & Sons, 1963. pp. 66-67.

21. Zamuz, E. M. de y Castro J. L. 1970. Evaluación de métodos de análisis de suelo para determinación de fósforo asimilable. Boletín Técnico No. 15.

APPENDICE

Apéndice 1a. Composición química de las rocas fosfatadas utilizadas.

		Hiperfosfato	P.F.N.
		g	g
Fósforo total	P_2O_5	30,9	33,3
Calcio total	CaO	50,0	47,0
Silice total	SiO_2	2,5	3,05
Azufre total	S	3,0	0,8
CO ₂		5,5	3,3
Fluor	F	2,5	3,6
Humedad		1,0	1,75

Apéndice 2a. Análisis de variancia de los datos de producción de materia seca.

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadrados medios	F
Bloques	3	513.596	3,49*
Fuentes	2	1:060.309	7,21**
Niveles	1	1:544.323	10,51**
F x N	2	115.628	1
E(a)	17	146.985	
Cortes	3	8:135.246	138,25**
F x C	6	283.775	4,61**
N x C	3	35.262	1
F x N x C	6	24.652	1
E(b)	60	61.511	

C.V. (a) = 23,74

* = $p < 0.05$

C.V. (b) = 15,36

** = $p < 0.01$

Apéndice 2b. Análisis de variancia de los datos de fósforo absorbido.

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadrados medios	f
Bloques	3	2,906	2,43 ^{NS}
Fuentes	2	13,185	11,00 ^{**}
Niveles	1	10,794	9,01 ^{**}
F x N	2	.941	1
E(a)	17	1,198	
Cortes	3	49,288	61,29 ^{**}
F x C	6	2,553	3,18 ^{**}
N x C	3	.162	1
F x N x C	6	.194	1
Error(b)	60	.804	

C.V. (a) = 27,43

C.V. (b) = 22,47

* = $p < 0.05$

** = $p < 0.01$

NS = no significativa

Apéndice 2c. Análisis de variancia de los datos de producción de materia seca para los cuatro cortes acumulados. (Datos de superfosfato y mezcla hiperfosfato-azufre juntos).

Puente de variación	Grados de libertad	Cuadrados medios	f
Niveles	2	5,238.435	35,64 **
Regresión	1	9,971.932	67,84 **
Desviación	1	504.934	3,44 NS
Error	17	146.985	

$$r^2 = .95$$

Apéndice 2d. Análisis de variancia de materia seca. Hiperfosfato

Puente de variación	Grados de libertad	Cuadrados medios	f
Niveles	2	353.530	2,40 NS
Regresión	1	368.082	2,50 NS
Desviación	1	338.978	2,31 NS
Error	17	146.985	

Apéndice 2e. Análisis de variancia de fósforo absorbido.
Superfosfato y mezcla hiperfosfato-azufre.

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadros medios	f
Divales	2	52,266	43,63 ^{**}
Regresión	1	103,041	86,01 ^{**}
Desviación	1	1,491	1,24 ^{NS}
Error	17	1,198	

$$r^2 = .99$$

Apéndice 2f. Análisis de variancia de fósforo absorbido.
Hiperfosfato.

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadros medios	f
Divales	2	22,435	1,87 ^{NS}
Regresión	1	9,924	1
Desviación	1	34,945	2,92 ^{NS}
Error	17	1,198	

Enviado
Hernández
de la
de la