

**FRACCIONAMIENTO, FIJACION Y LIBERACION DE FOSFORO EN SUELOS
DERIVADOS DE CENIZAS VOLCANICAS DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO**

Ramón Gualdrón A.*
Francisco Herrón O.**

RESUMEN

Con el objeto de determinar las formas del fósforo nativo, la capacidad de liberación o desorción, fijación y evaluación de fuentes y niveles de fertilización se ejecutó un trabajo en suelos derivados de cenizas volcánicas del oriente antioqueño.

La fase de fertilización se realizó en condiciones de invernadero utilizando como plantas indicadoras pasto brasileño (*Phalaris s.p.*) y rábano (*Raphanus sp.*). Las determinaciones analíticas se hicieron en laboratorio según métodos desarrollados por otros autores.

No hubo respuestas significativas en los niveles bajos e intermedios de fertilización. No se encontró efecto residual al utilizar una fuente de "lenta disponibilidad". Se observó una altísima capacidad de fijación y una baja tasa de liberación de fósforo a la solución del suelo.

Las formas nativas de fósforo se manifiestan así: P - Orgánico > P - Al > P - Ocluido > P - Ca > P - Fe > P - Fr. El fósforo aplicado se fijó principalmente como P - Al, P - Orgánico, P - Ca y P - Fe, como consecuencia de los altos contenidos de alúmina.

ABSTRACT

A soil of "oriente antioqueño" derived from volcanic ashes was studied in order to determine its P native forms, P sorption and desorption capacities, P sources evaluation and P fertilizer response.

* Estudiante. Actualmente Ingeniero Agrónomo. CIAT. Carimagua.

** Profesor Asociado. Departamento de Ciencias de la Tierra - Universidad Nacional - Medellín.

The fertility studies were conducted under greenhouse conditions utilizing "brasileiro" grass (Phalaris sp.) and radish (Raphanus sp.) as indicator plants.

No significant response was found to medium and lower P fertilization levels. Long term response to low solubility P fertilizer was not observed either. The soil showed a high P fixing capacity and a low desorption rate.

The main P native forms were: P organic > P - Al > P - ocluded > P - Ca > P - Fr. The phosphorus used as fertilizer was fixed as P - Al, P - organic, P - Ca and P - Fe.

I. - INTRODUCCION

El suelo es un sistema dinámico compuesto por cuatro fases: sólida, líquida, gaseosa y biológica. Como resultado de las interacciones de las cuatro fases entre sí y las plantas, se desarrolla un trabajo cuya medida está dada por la producción vegetal.

Se sabe que el fósforo es elemento esencial en la nutrición de las plantas, por lo tanto es de importancia no solo en el campo agrícola, sino también pecuario y humano, conocer detalles acerca de su comportamiento y disponibilidad de cada una de las formas en que se le encuentra en el suelo.

En vista del empirismo con que se ha tratado el problema del fósforo, se hace necesario adelantar investigaciones que contribuyen a cualificar y cuantificar las fuentes naturales de suministro, las transformaciones e interacciones que se suceden al aplicar fertilizantes fosfatados, con el fin de obtener criterios más lógicos aplicables en futuros diagnósticos.

El presente trabajo trata de presentar algunas de las causas que impiden una mayor disponibilidad de este elemento en suelos volcánicos del Oriente Antioqueño, región que comprende una amplia extensión con una alta densidad de población y donde análisis anteriores han demostrado una alta fijación e inmovilización.

II. - REVISION DE LITERATURA

El fósforo es un elemento relativamente estable en el suelo. Esta estabilidad se puede decir que es función de la dinámica a que se halla sometido mediante reacciones y transformaciones de diferentes tipos que caracterizan las distintas fases y su composición en el suelo.

A. FOSFORO TOTAL.

Incluye las cantidades y concentraciones que hay en todas las fases en un momento dado. Su contenido varía de acuerdo al tipo de suelo, material parental, condiciones ecológicas, profundidad y manejo.

En América Central, Bornemisza y Morales (1969) citados por Ospina (1974), determinaron en suelos de cenizas volcánicas valores de 1270 ppm. En Colombia, Guerrero R. (1974) encontró contenidos desde 340 ppm en Amazonas, hasta 1467 ppm en el Valledel Cauca. Benavides (1963) y Blasco (1969) citados por Kamprath (1974) dieron cuenta de valores para suelos latosólicos y de cenizas volcánicas de 179 y 1465 ppm respectivamente.

Trabajos previos de Fassbender y Tschinkel (1974) en la zona de estudio (Oriente Antioqueño) determinaron valores promedios para 21 perfiles de 710 ppm.

Sánchez (1974), encontró en un andosol de la selva (Rionegro), un contenido de 1475 ppm.

B. FOSFORO INORGANICO.

A partir del método de fraccionamiento de fósforo desarrollado por Chang y Jackson (1957) muchos han sido los trabajos generados siguiendo esta metodología, la cual permite mediante la utilización de soluciones extractoras específicas separar y determinar las fracciones del fósforo ligadas al Aluminio, Hierro, Calcio y ocluidos en complejos óxidos de Hierro y Aluminio.

El ácido fosfórico es la base de formación de todas las formas inorgánicas que se encuentran en el suelo casi exclusivamente como ortofosfatos. La disociación de H_3PO_4 en $H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-} , PO_4^{3-} , permite que estos aniones reaccionen con el complejo coloidal del suelo, cationes, y se formen sales definidas como P- Aluminio, P- Calcio, P- Hierro, P- Ocluido, Fassbender (1968).

Como factores que influyen en las formas inorgánicas se tienen: grado de meteorización, actividad de cationes, pH, propiedades mineralógicas del suelo, topografía y drenaje. A pH ácidos, la actividad del Fe y Al aumenta, los P-Ca se tornan solubles convirtiéndose en compuestos de Fe y Al menos solubles. Así mismo, el régimen de humedad, edad del suelo y altura sobre el nivel del mar, son de alguna importancia, Kamprath (1974).

Con respecto al suelo en sí, Kamprath (1974), analizando observaciones de otros autores concluyó que la fracción inorgánica predomina

mina sobre la orgánica para suelos de cenizas volcánicas. Benavides (1975) para suelos volcánicos de Nariño (Colombia), encontró sin embargo que esta fracción solo alcanzaba el 27% del P-total en horizontes Al, y 48% en el subsuelo.

Morillo y Fassbender (1968), en estudios sobre fósforo en Honduras, concluyeron que los P-Ca predominan dentro de la fracción inorgánica en suelos aluviales, y P-Ocluidos en suelos volcánicos.

En suelos maduros predominan los P-Fe, P-Ocluidos y P-solubles en reductantes sobre los demás; en suelos jóvenes, P-Ca y en suelos ligeramente desarrollados, las proporciones se presentan balanceadas, Fassbender (1966). Así mismo, a mayor grado de meteorización, aumenta la importancia de los P-Fe y disminuye la de los P-Al, Kamprath (1974). Existen correlaciones directas entre el pH y los P-Ca, e inversas con P-Fe y P-Al, Morillo y Fassbender (1968).

Suelos con estaciones marcadas de sequía y humedad presentan predominancia de P-Fe, suelos mal drenados favorecen la formación de P-Al, Kamprath (1974). Según Guerrero R. (1974), en Colombia se presenta una disminución del P-total, P-Ocluido, P-Ca, con la precipitación; un incremento del P-Fácilmente reemplazable (P-Fr), P-Al y P-Ocluido cuando se asciende sobre el nivel del mar.

Ospina (1974) en un resumen sobre fraccionamiento de fósforo realizados por diferentes autores informa de una predominancia de P-Al y P-Fe sobre P-Ca en suelos volcánicos de Centroamérica y Colombia (excepto Nariño).

En la Tabla 1 se consignan valores de cada una de las formas de fósforo dadas en % de P-Total, encontrados por Fassbender y Tschinkel (1974) en diferentes perfiles del Oriente Antioqueño.

TABLA 1. Contenido y formas de P en Oriente Antioqueño(Colombia)

	P-Al	P-Fe	% P-Total		
			P-Ca	P-Ocluido	P-Orgánico
Máximo	5.76	10.24	15.23	57.28	60.98
Mínimo	1.63	3.66	2.45	29.40	26.87
Promedio	2.78	6.18	9.66	46.19	36.31

C. FOSFORO ORGANICO.

Se considera que esta forma proviene de la resíntesis microbial y de los residuos orgánicos que llegan al suelo.

El P- Orgánico se encuentra formando parte de fosfolípidos, ácidos nucleicos, compuestos fosfometabólicos, fosfoproteínas y fosfatos del ácido inositolhexafosfórico o inositol, este último en una relación del 50%, Fassbender (1975).

Según Blasco (1974), su composición es: 50% del P-Orgánico esterificado con el ácido fítico (inositol), 10 - 20% como fosfatos de ADN y RNA, 1 - 2% de fosfolípidos y 1% o menos de fosfoazúcares y coenzimas fosforadas.

Como factores que inciden en el contenido de P- Orgánico en el suelo se tienen: Contenido de materia orgánica, relación C/P, temperatura, pluviosidad, pH, material parental, actividad microbial, grado de meteorización.

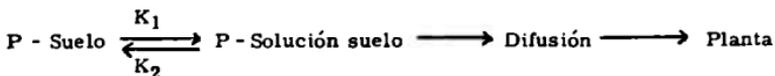
La relación C/P expresa la contribución de fósforo de la materia orgánica. Según Black y Goring, citados por Fassbender (1975), se presenta en general una relación C/N/P en la materia orgánica de 110 : 9 : 1. Para suelos tropicales la relación C/P oscila entre 200 : 1 y 300 : 1.

La actividad de los microorganismos influye también en el contenido de P- Orgánico, aumentando su disponibilidad pero disminuyendo su importancia, Blasco (1974).

De otra parte, suelos jóvenes presentan altos contenidos de P- Orgánico en contraste con suelos maduros. Así mismo, en suelos pobres en fósforo nativo, se observan proporciones pequeñas de esta fracción, Bornemisza (1966).

D. DINAMICA DEL FOSFORO EN EL SUELO.

Para Gunary y Sutton, citados por Kamprath (1974), los factores que influyen en el suministro de fósforo a las plantas se pueden representar en una forma muy general así:



Según ellos, las plantas toman el fósforo de la solución del suelo. El movimiento hacia las raíces se hace en base al gradiente de con-

centración y las interacciones entre el P - Libre y la fase sólida.

Helyar y Munns (1975) determinaron para los fosfatos del sistema suelo - planta cinco fases así: Fosfato en plantas, fosfatos inorgánicos en solución del suelo, fertilizantes fosfatados, fosfatos adsorbidos y fosfatos lentamente disponibles. No consideraron fosfatos orgánicos del suelo. Sin embargo, tomaron en cuenta cada uno de los cambios de fase, las posibles variables que intervienen y en base a ecuaciones propias y de otros autores desarrollaron modelos de flujo de fosfatos.

Suponiendo un modelo de flujo en base a un fertilizante fosfatado aplicado al suelo, se tiene en primera instancia una disolución de este en H_3PO_4 , con un medio ácido de pH 1.8, Fassbender (1975). Este primer cambio puede ser representado según Helyar y Munns (1975) con una función en donde la disolución del fertilizante está dada por la ecuación:

$$\frac{dF_p}{dt} = -K_3 F_p \quad (1)$$

Donde, F_p : Fertilizante (μ moles/cm³ suelo)

t : Tiempo (horas)

K_3 : Constante de solubilidad del fosfato (horas⁻¹)

Una vez el fosfato se incorpora a la solución del suelo, este es adsorbido en las superficies de los minerales del suelo, Larsen (1967). Gunary (1970) propuso una función que explica esta segunda fase así:

$$\frac{1}{X} = B + \frac{A}{C} + \frac{D}{C} \quad (2)$$

Donde, X = Fosfato adsorbido (μ moles/cm³ suelo)

C = Concentración de fosfato en solución (μ mol/ml)

A, B, D = Constantes experimentales de adsorción máxima a diferentes tiempos, a partir de un $t = 0$.

Posterior a la adsorción se presenta una reacción de fijación (precipitación) caracterizada por una lenta solubilización. Esta última puede ser también afectada en alguna forma cuando la concentración de fosfatos en el suelo es disminuida por la adsorción de las plantas en crecimiento, Larsen (1967), Probert (1972).

Una descripción de la relación existente entre la fase de lenta solubilidad del P - Inorgánico nativo o fijado y la solución del suelo podría ser expresada en función de las constantes de solubilización de

cada una de las formas del fósforo, de su concentración, tensión de humedad del suelo, a tiempos dados.

Hay que considerar también la relación que se presenta cuando los fosfatos son removidos de la solución del suelo. Sin embargo, es difícil para períodos largos establecer con exactitud la proporción entre la remoción de P - adsorbidos y P - poco solubles debido en gran parte a que prima generalmente el efecto de fijación ó adsorción.

De la absorción de fosfatos por las plantas, se sabe que estas los toman desde la solución del suelo. Los principios involucrados en la difusión y convección de nutrientes del suelo hacia las raíces y su absorción son similares, Helyar y Monns (1975).

Para el caso correspondiente al P - Orgánico y su transformación (mineralización) se puede inferir que es función de factores como: contenido de materia orgánica, composición del P - Orgánico, relación C/P, biodegradabilidad de cada una de las fracciones orgánicas, flora del suelo, pH, temperatura, contenido de humedad del suelo.

Experiencias y trabajos de investigadores interesados en el problema del fósforo han contribuído en una forma amplia a clarificar la dinámica de este elemento en el suelo.

Según Fassbender (1975), una vez el fosfato es aplicado, por disolución se convierte a H_3PO_4 , reacciona con los cationes del suelo (Ca, Fe, Al) para formar P - Ca, P - Al, P - Fe, liberando simultáneamente energía.

La cantidad de fósforo en la solución del suelo, dice Kamprath (1974), es función de la capacidad de fijación del suelo y del porcentaje de saturación de esta capacidad. Para suelos ácidos minerales, la capacidad de fijación está determinada por las cantidades y naturaleza de los óxidos hidratados de hierro y aluminio, y las cantidades de aluminio intercambiable.

Según Dawghthrey y colaboradores (1971), suministros desde la fase sólida a la solución del suelo menores de 0.6 Kg/Ha/0.5 horas son insuficientes para un abastecimiento potencial a las plantas, en tanto que valores arriba de 1 Kg de P/Ha/0.5 horas si son adecuados.

Islam y Ahmed (1973), en suelos orgánicos de la India con contenidos del 50% del P - Orgánico como P - Inositol encontraron que a mayor contenido de humedad del suelo, su concentración disminuía

con el tiempo. Furukawa y Kawaguchi (1969), determinaron una rápida hidrólisis del P - Inositol en cultivos de arroz cuando se mantuvo inundado por un período de dos semanas a 40°C.

Para Hgu (1965), debido al efecto del pH, la superficie reactiva de los hidróxidos de aluminio y óxidos de hierro predomina en el proceso de fijación sobre el aluminio intercambiable y el hierro libre en solución. A un pH de 5.0, la actividad del Al^{3+} y el Fe^{3+} es insignificante con relación a los óxidos e hidróxidos de Fe y Al.

Sánchez (1974), en su revisión de literatura, dice que la retención del fósforo en suelos ácidos volcánicos resulta de la reacción de los iones ortofosfatos con compuestos de Fe y Al, arcillas silicatadas y la alofana.

E. EL FOSFORO EN ANDOSOLES.

De acuerdo a las conclusiones de la reunión sobre clasificación y correlación de suelos derivados de cenizas volcánicas verificada en Tokyo 1964, Ospina (1974) los rasgos especiales de los andosoles son: Horizonte A oscuro, friable, relativamente profundo; alto contenido de materia orgánica, baja densidad, poca pegajosidad, alta capacidad de retención de humedad; horizonte B sin cantidades significativas de arcilla iluvial; fracción activa dominada por materiales amorfos.

Los andosoles se caracterizan también por un alto contenido de P-Total y poco fósforo disponible, alta capacidad de fijación debida principalmente al aluminio, Kamprath (1974), González (1970).

Fassbender (1969), en suelos volcánicos de Costa Rica encontró experimentalmente en 5 suelos que de la cantidad de fosfato aplicado, 2.95% se fijaba en la fracción extractable con NH_4Cl , 1.64% como P - Ca, 85.56% como P - Al y 14.4% en P - Fe.

Para Ospina (1974), el Al en algunas de sus formas inorgánicas es responsable en gran parte de la retención de fosfatos en los andosoles, ya sea a través de mecanismos de adsorción, precipitación, hidrólisis o disociación, siendo necesario descifrar para cada suelo el mecanismo apropiado con el fin de llegar a un mejor conocimiento del comportamiento del fósforo aplicado y sus futuras implicaciones.

Para este tipo de suelos, Wada (1959), dice que a un pH cercano a 4.0, la reacción del fósforo con la alofana es muy rápida debido a la alta superficie específica que está presente.

Bornemisza (1966), dice que la alofana forma compuestos estables con la materia orgánica dificultando así la mineralización del P - Orgánico lo que explicaría su acumulación en los andosoles. Blasco (1974), considera que al aumentar el porcentaje de alofana se propicia la estabilización de la materia orgánica.

F. RECOMENDACIONES SOBRE USO DE FERTILIZANTES Y MANEJO

Guerrero M. (1974), en suelos de clima frío, correlacionando contenidos de fósforo disponible en el suelo y métodos, encontró valores más altos por el método Bray II. Estableció niveles de contenido y respuesta a la fertilización fosfórica así: Cantidades menores de 20 ppm. de fósforo disponible, presentan respuestas altas; entre 20 y 40 ppm., respuestas medias y suelos con contenidos mayores de 40 ppm. sin respuesta. Anota que en suelos ácidos ricos en materia orgánica, fijadores de fósforo, con alta CIC, bajo contenido de bases, contenido relativamente adecuado de potasio, alto Al^{3+} , la aplicación de fertilizantes fosfóricos aumenta la producción en más del 100%.

El ICA, en caracterizaciones de fertilidad ha establecido los siguientes niveles de fósforo disponible para suelos de clima frío: Altos, para contenidos mayores de 30 ppm., medios entre 15 y 30 ppm., bajos para valores inferiores a 15 ppm.

Ospina (1974), sugiere que en estos suelos volcánicos, se deben hacer aplicaciones de abonos orgánicos de rápida descomposición, en calamientos moderados con el fin de neutralizar el Al^{3+} , aplicación de silicatos, aplicación de polifosfatos, realizar aradas superficiales e infrecuentes. Blasco (1974), menciona el empleo de sustancias orgánicas que inciden en el ciclo de Krebs, incrementando la actividad biológica y la correspondiente mineralización del P - Orgánico.

G. SUELOS DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO

Espinal (1964), de acuerdo a Holdrige clasifica a esta región como bosque húmedo-montano bajo (Bh -mb), con una precipitación anual entre 1800 y 2000 mm, y una temperatura entre 16 y 19 °C.

Para Fernández y Santa (1964), estos suelos son derivados de rocas ígneas (batolito), metamórficas (anfibolitas), terrazas y aluviones cuaternarios, y mantos de cenizas altamente meteorizadas. Este último material según Hermelín (1973), fue depositado durante el cuaternario, originado hace por lo menos cuatro siglos y muy seguramente es de tipo dacítico o andesítico proveniente del macizo Ruiz/Tolima.

Análisis químicos de estos suelos indican una alta CIC, cantidades apreciables de alofana, evidencia de Al^{3+} en horizontes superiores, escasa saturación de bases, marcada acidez, poca actividad microbial, campo favorable a la lixiviación, no presenta respuesta a K_2O pero sí a elementos menores, Fernández y Santa (1964).

León (1964), aplicando en un suelo de la Selva 800 ppm. de fósforo encontró que éste fue fijado en su totalidad. Monsalve y Lotero (1972), confirmaron la alta capacidad de fijación de estos suelos, no encontrando respuesta al efecto residual de aplicaciones tan altas como 1000 Kg P_2O_5 /Ha.

Sánchez (1974), encontró que después de aplicar 800 ppm. de fósforo, escasamente se presentaban 15 y 20 ppm. de fósforo en la solución del suelo, al cabo de 48 horas.

León (1967), citado por Sánchez (1974), menciona como principales responsables de la fijación de fósforo en la Selva, la alofana, Al^{3+} , Al ligado a la materia orgánica y sesquióxidos de Fe y Al.

Gutiérrez y Rendón (1974), en un suelo de la región (Rionegro) encontraron que al no aplicar fertilizantes fosfatados, la cantidad de fósforo liberada en la capa arable de una hectárea en media hora fue inferior a 1.0 Kg, considerándosele como insuficiente. Así mismo, al aplicar 300 Kg P/Ha en forma de fosfato dicálcico, a pesar del incremento notado en la liberación, solo se alcanzó en una extracción hasta 0.91 Kg P/Ha/0.5 h, estabilizándose a partir de la novena extracción en valores cercanos a 0.24 Kg P/Ha/0.5 h, considerados como insuficientes.

En lo que respecta a fertilización fosfórica se tiene de acuerdo a experimentos realizados en la subestación La Selva, ICA (1974), una máxima producción en maíz al aplicar 200 Kg P_2O_5 /Ha, 300 a 400 Kg P_2O_5 /Ha en hortalizas y de 200 a 300 Kg P_2O_5 /Ha en papa.

III.- MATERIALES Y METODOS

A. - SUELOS

Se tomó un suelo de Rionegro (Antioquia) con las siguientes características :

Relieve :	Ondulado
Drenaje Interno :	Bueno
Profundidad :	0 - 20 cms.
Densidad aparente :	0.70 gr/cm ³
Textura :	No dispersó

pH :	4.77		
% M.O. :	23.6		
% N Total :	1.1		
P (Bray II) :	6 ppm		
CIC :	58.0 meq/100 gr. suelo		
Al :	1.40	"	"
Ca :	3.00	"	"
Mg :	0.80	"	"
K :	0.40	"	"

B. DISEÑO EXPERIMENTAL Y FERTILIZACION

Para observar el comportamiento y respuesta al fósforo aplicado, se adelantó un ensayo en potes en el invernadero con un diseño de bloques al azar conformado por siete tratamientos replicados tres veces.

Los siete tratamientos de fertilidad considerados fueron: Un testigo (0 Kg P₂O₅/Ha), 225 - 450 - 900 Kg P₂O₅/Ha en forma de calcos y 225 - 450 - 900 Kg P₂O₅/Ha como superfosfato triple.

Con respecto a los demás nutrientes, se aplicó a todas las unidades experimentales una fertilización de base igual, según Tabla 2.

TABLA 2. Fertilización constante.

Elemento	Niveles Kg/Ha	Cantidades mgr/ pote	Fuentes
N	150.0	160.71	Urea (46% N)
K ₂ O	150.0	160.71	KCl (60% K ₂ O)
Mg	200.0	214.28	Mg SO ₄ . 7H ₂ O (9.86 % Mg)
Zn	4.0	4.28	Zn SO ₄ . 7H ₂ O (22.7 % Zn)
B	1.0	1.07	Na ₂ B ₄ O ₇ . 10 H ₂ O (11.3 % B)
Mo	0.5	0.53	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ . 4 H ₂ O (54.3%Mo)

Con el fin de neutralizar el aluminio intercambiable y suministrar una fuente de calcio se aplicó el equivalente a 2.1 toneladas de

CaCO₃ como CaO, en cantidades de 1.25 gr de CaO por pote.

C. PLANTAS INDICADORAS

Se sembraron inicialmente cuatro estacas/pote de pasto brasilero (phalaris sp.). Un primer corte se hizo a los 90 días después de la siembra y uno último a los 160 días. En ambos casos se cortó a una altura de 15 cm.

Debido a la baja adaptación, lento desarrollo, en condiciones de invernadero mostradas por la gramínea, se procedió a cambiar de planta indicadora. Finalizado el segundo corte, se incorporaron al suelo de los potes todos los residuos. 15 días después, se realizó la siembra de rábano (Raphanus sp.), colocando 8 semillas/pote, dejando finalmente 3 plantas.

La primera cosecha se hizo a los 40 días. El mismo día se sembró de nuevo, repitiendo el mismo procedimiento. Los rendimientos se determinaron en base a gramos de bulbos frescos/pote, libras de hojas y raíces.

Para el caso de la gramínea, el material cortado se secó en estufa a 72°C durante 48 horas, se pesó, y se determinaron rendimientos en materia seca/pote.

El contenido de humedad del suelo, se mantuvo cercano al punto de capacidad de campo mediante riegos diarios. Posterior a cada cosecha o corte se aplicaron 50 Kg N/Ha como urea en solución.

D. PREPARACION DE MUESTRAS DE SUELO

Finalizado el trabajo de invernadero, se tomó una muestra por cada pote, se secó al aire libre por 48 horas y se hicieron pasar a través de una malla 40.

E. ANALISIS DE SUELOS

A partir del suelo preparado, utilizado en el trabajo de invernadero, se caracterizó el suelo y se determinó la fijación y la liberación del fósforo. Además se efectuó el fraccionamiento del mismo elemento.

F. FIJACION DE FOSFORO

Se determinó en base al método de sorción total de fósforo descrito por Kurtz (1946), con las modificaciones empleadas por Vallejo y Araque (1974).

Se tomó 1.0 gr de suelo de cada pote. Se prepararon soluciones de fósforo a partir de K_2HPO_4 . A cada muestra se aplicó 50 ml de solución que contenían 100 - 200 - 400 - 800 μ gr P respectivamente. Se mantuvo una agitación constante durante 30 minutos, posteriormente se dejaron en reposo por espacio de 48 horas. Se agitó nuevamente, se filtró y se determinó P colorimétricamente.

G. LIBERACION DE FOSFORO

Se utilizó el método descrito por Gutiérrez y Rendón (1974). Consistió en hacer pasar un flujo constante de agua a través de una capa de suelo de 5 gramos, colocada entre dos de cuarzo lavado previamente con HCl, dentro de un embudo de cristal, con una columna permanente de agua en la parte superior. Cada una de las capas, separada con un disco de papel de filtro.

El aire de los espacios porosos del sistema se desplazó saturando el medio por succión durante 16 horas.

Posteriormente se sometió a un lavado continuo durante 10 horas, retirando cada media hora un volumen aproximado de 50 ml. El flujo se graduó mediante un aditamento de presión ajustado a una manguera plástica acoplada en la parte inferior del embudo.

Este procedimiento se realizó con cada una de las soluciones en todas las unidades experimentales en que consistió el ensayo de invernadero. El fósforo de los filtrados fué determinado colorimétricamente.

H. FRACCIONAMIENTO DE FOSFORO

Para las fracciones del fósforo inorgánico se empleó el método de Chang y Jackson (1957), sin modificaciones. El fósforo total y orgánico por el método Cenicafé, López (1960).

Se hizo este análisis en el tratamiento testigo y en los que se aplicaron 450 kg P_2O_5 /Ha de Calfos y superfosfato triple, que corresponden a los niveles que se utilizan normalmente en cultivos de la zona.

IV.- RESULTADOS

A. CARACTERIZACION DE SUELOS

En la tabla 3 están consignados los resultados de los análisis químicos correspondientes a los tratamientos en que se hizo fraccionamiento de fósforo, finalizada la etapa de invernadero.

Tabla 3. Propiedades químicas de suelos tratados con 0 y 450 Kg P_2O_5 /Ha como Calfos y Superfosfato triple.

Análisis	Testigo 0 Kg P_2O_5 /Ha	Calfos 450 Kg P_2O_5 /Ha	S F T 450 Kg P_2O_5 /Ha
pH	4.9	4.8	4.8
% M.O.	27.0	24.8	28.1
% N. Total	1.3	1.2	1.1
P (ppm) Bray II	3.2	1.8	2.8
CIC(meq/100 gr)	65.5	64.4	66.2
Al (meq/100 gr)	0.5	0.6	0.7
Ca (meq/100 gr)	8.0	7.0	5.0
Mg (meq/100 gr)	2.0	1.0	1.0
K (meq/ 100 gr)	0.19	0.21	0.21

No se observaron diferencias mayores entre los tratamientos sin embargo, comparados con el suelo original (antes de fertilizar) se encontró una marcada disminución en el aluminio libre como resultado de la aplicación del correctivo. Se incrementaron los contenidos de calcio y magnesio, el fósforo disponible se mantuvo en valores bastante bajos.

B. - RESPUESTA A LA FERTILIZACION FOSFORICA.

1. Pasto Brasileiro (Phalaris sp.).

Los rendimientos de los dos cortes realizados figuran en la tabla 4.

De acuerdo a la figura 1, en el primer corte, cuando el fósforo se aplicó como superfosfato triple se observó respuesta solamente al primer nivel (225 Kg P_2O_5 /Ha). Con Calfos, la curva muestra una respuesta moderada aún al nivel de 900 Kg P_2O_5 /Ha.

Las diferencias observadas se debieron posiblemente a la diferente

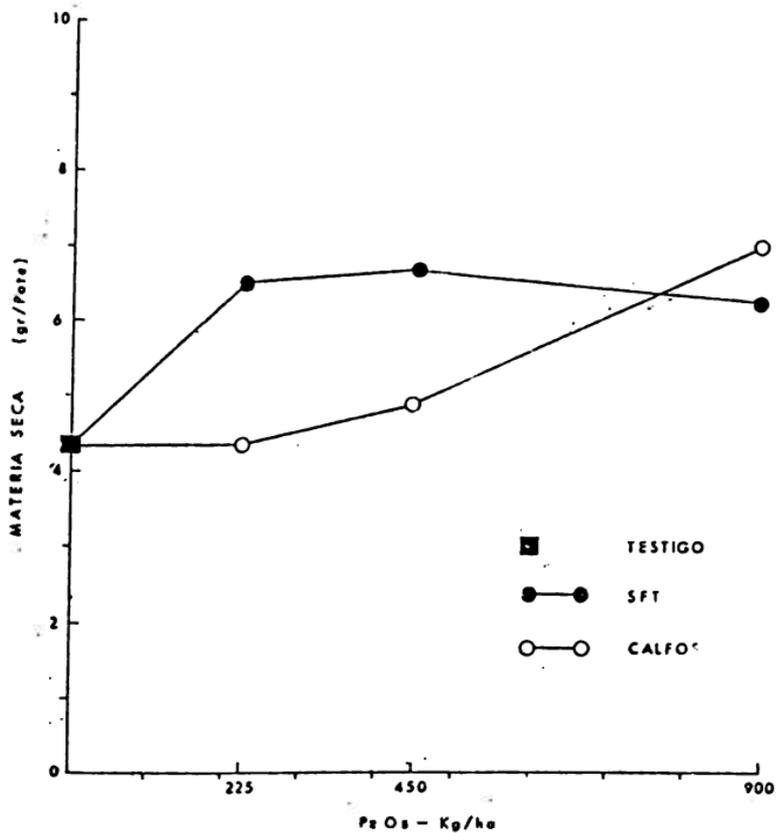


Figura 1. Respuesta del pasto brasilero (*Phalaris* sp.) a fósforo.
Primer corte.

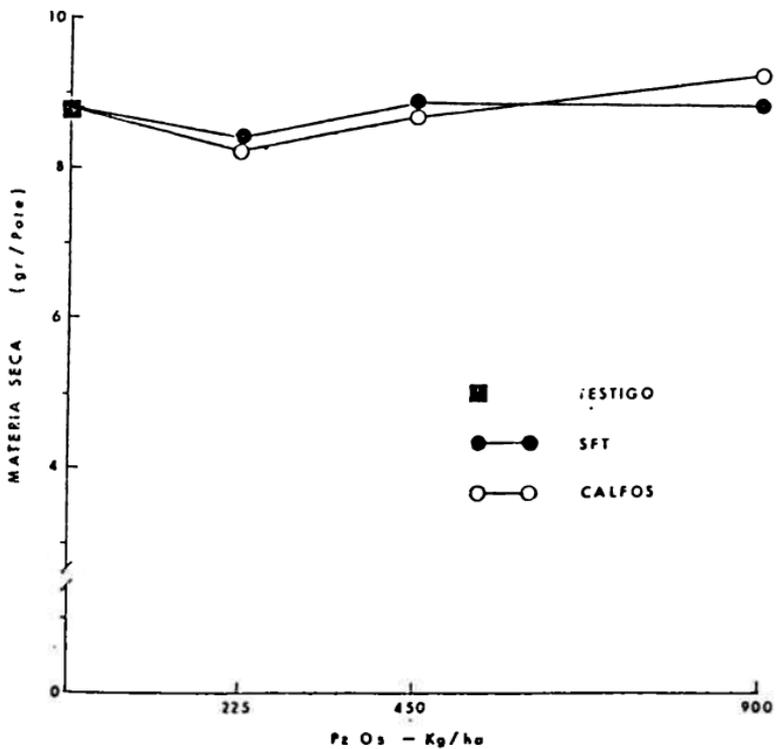


Figura 2. Respuesta del pasto brasilero (*Phalaris* sp.) a fósforo. Segundo corte.

tasa de solubilidad de cada una de las fuentes.

La figura 2 muestra que ya en el segundo corte, 190 días después de aplicado el fósforo, no hay ningún tipo de respuesta.

Análisis estadísticos no reportaron diferencias significativas entre tratamientos.

Tabla 4. Rendimientos en materia seca (gr/pote) de pasto brasilero (Phalaris sp.). Promedio de tres repeticiones.

Tratamientos P ₂ O ₅ -Kg/Ha	Primer corte 13 semanas	Segundo corte 10 semanas
0	4.30	8.79
225 - Calfos	4.34	8.21
450 - Calfos	4.90	8.66
900 - Calfos	7.00	9.18
225 - S F T	6.51	8.39
450 - S F T	6.79	8.83
900 - S F T	6.23	8.80

2. Rábano (Raphanus sp.)

Los rendimientos obtenidos de las dos cosechas están consignados en la tabla 5.

La figura 3, permite observar que en la primera cosecha cuando se utilizó superfosfato triple se obtuvo una marcada respuesta a partir de 450 Kg P₂O₅/Ha. Con calfos, solamente en la aplicación de 900 Kg P₂O₅/Ha se obtuvo respuesta. Sin embargo, el análisis estadístico reportó diferencias significativas únicamente en los tratamientos con 900 Kg P₂O₅/Ha, como Calfos y superfosfato triple.

En la segunda cosecha, Figura 4, se obtuvo respuesta hasta 225 Kg P₂O₅/Ha con superfosfato triple, estabilizándose en ese punto la curva. En Calfos, con excepción del nivel de 450 Kg P₂O₅/Ha se observaron incrementos hasta el nivel mayor. Cabe destacar que cuando se aplicaron 900 Kg P₂O₅/Ha el Calfos superó como fuente al superfosfato. Estadísticamente solo la aplicación alta de fósforo como Calfos mostró diferencias significativas con respecto al testigo.

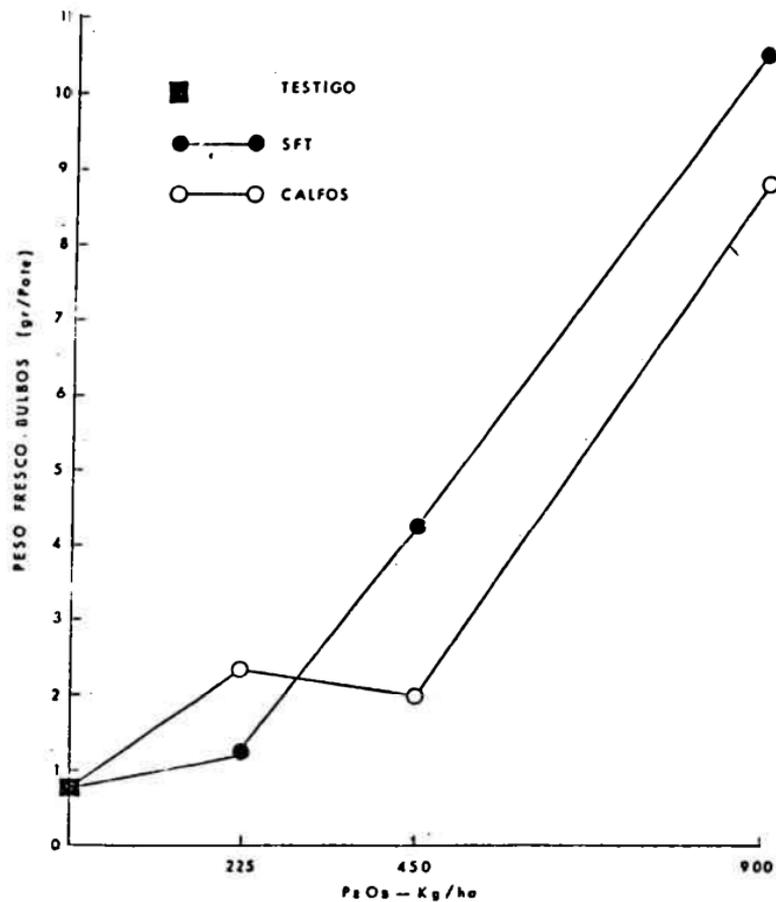


Figura 3. Respuesta de rábano (*Raphanus* sp.) a fósforo
Primera cosecha.

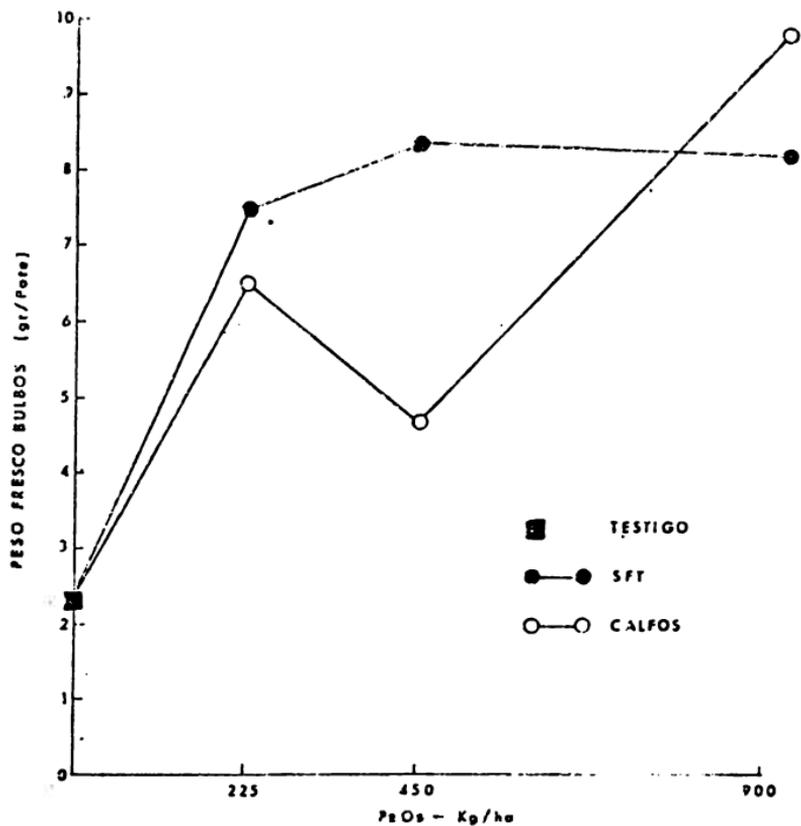


Figura 4. Respuesta de rábano (Raphanus sp) a fósforo
Segunda cosecha.

Tabla 5. Rendimientos en bulbos frescos (gr/pote) de rábano (Raphanus sp.). Promedio de tres repeticiones.

Tratamientos P ₂ O ₅ - Kg/Ha	Primea cosecha 40 días	Segunda cosecha 40 días
0	0.76	2.33
225 - Calfos	2.35	6.54
450 - Calfos	1.99	4.69
900 - Calfos	8.78	9.83
225 - S F T	1.28	7.51
450 - S F T	4.28	8.44
900 - S F T	10.54	8.25

C. - FIJACION DE FOSFORO

El comportamiento de los suelos en todos los tratamientos fué similar, Figura 5. A pesar de fertilizar con altas aplicaciones de fósforo, al tratar estos suelos con soluciones que suministraron 100 - 200 - 400 - 800 μ gr P respectivamente, las cantidades recuperadas no alcanzaron niveles de significancia como para lograr un suministro adecuado de fósforo, Tabla 6. Los porcentajes de fijación del fósforo aplicado oscilaron entre 95.3 % y 99.9 %.

D. - LIBERACION DE FOSFORO.

1. Suelo sin fertilizar.

Solamente a partir de la 11a. extracción se presentó una estabilización en la tasa de desorción constante ó liberación, véanse figuras 6 y 7, tratamiento testigo.

Considerando una densidad aparente del suelo de 0.7 gr/cm³ se tiene que para condiciones de no fertilización fosfórica, este suelo está en capacidad de suministrar en forma continua a la solución del suelo 0.40 μ gr P/gr-suelo/0.5 h, ó lo que es igual, 0.56 Kg P/Ha/0.5 h.

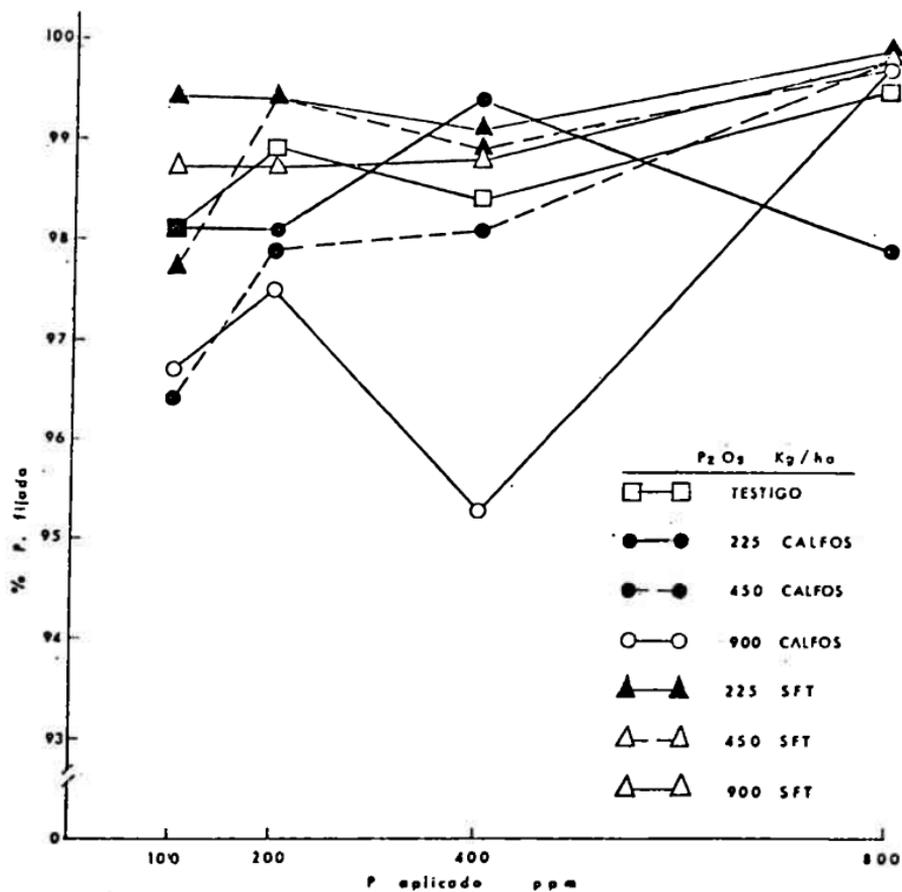


Figura 5. Capacidad de fijación de suelos de Rionegro tratados con fertilizantes fosforados.

Tabla 6. Fijación de fósforo en suelos de Rionegro (Antioquia), bajo diferentes fuentes y niveles de fertilización fosfórica. Promedio de tres repeticiones.

Tratamientos P ₂ O ₅ -Kg/Ha	P - Aplicado							
	100 μ gr P. Solución P. Fijado %	200 μ gr P. Solución P. Fijado ppm	400 μ gr P. Solución P. Fijado %	800 μ gr P. Solución P. Fijado ppm	800 μ gr P. Solución P. Fijado %	800 μ gr P. Solución P. Fijado ppm		
0	1.9	98.1	2.2	98.9	6.2	98.4	4.3	99.5
225 - Calfos	1.9	98.1	3.7	98.1	2.5	99.4	1.3	99.9
450 - Calfos	3.6	96.4	4.2	97.9	7.8	98.1	1.7	99.8
900 - Calfos	3.3	96.7	5.0	97.5	18.8	95.3	2.3	99.7
225 - S F T	0.6	99.4	1.2	99.4	3.6	99.1	1.3	99.9
450 - S F T	2.3	97.7	1.2	99.4	4.2	98.9	2.6	99.7
900 - S F T	1.3	98.7	2.5	98.7	5.0	98.8	2.6	99.8

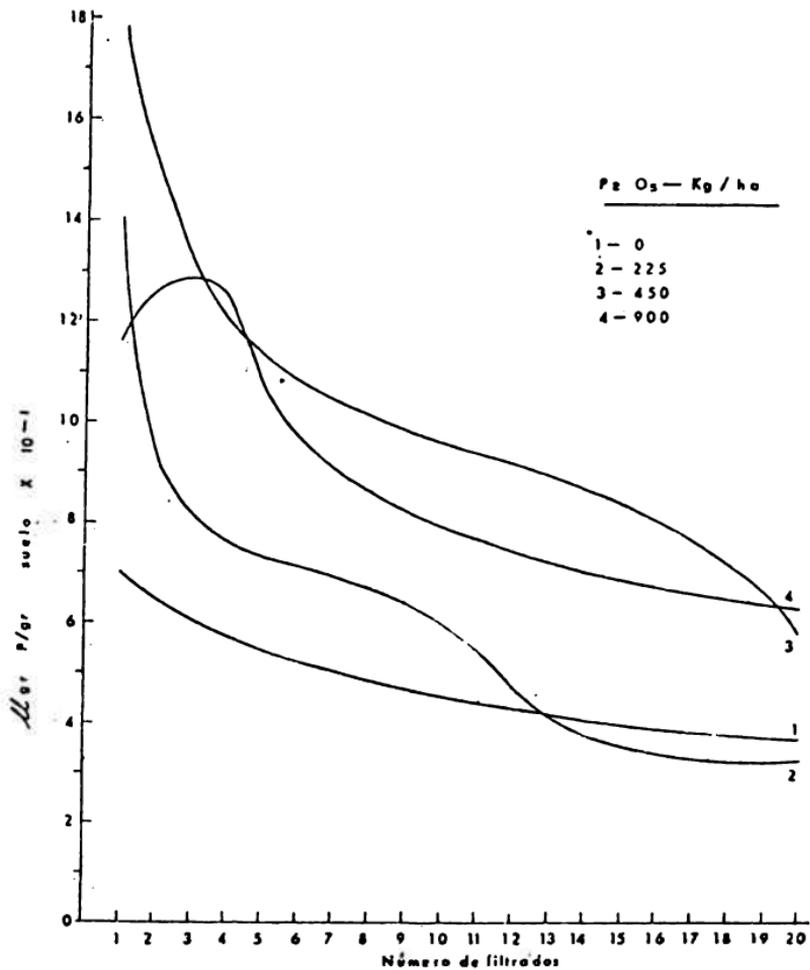


Figura 6. Liberación de fósforo a diferentes niveles de fertilización con Calfos

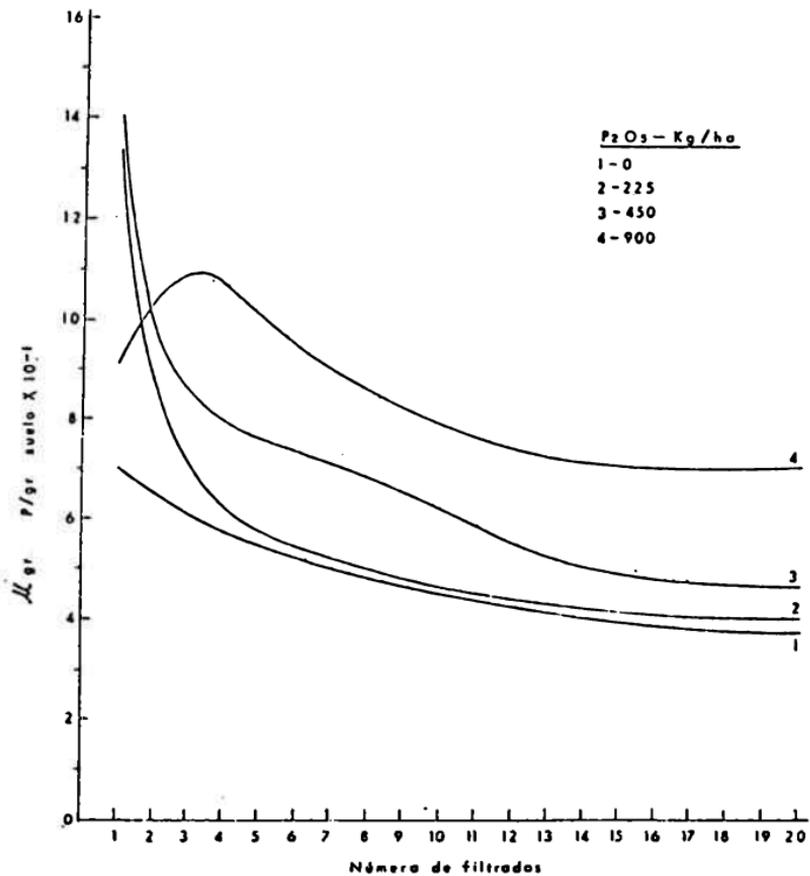


Figura 7. Liberación de fósforo a diferentes niveles de fertilización con Superfosfato Triple.

2. Fertilización con Calfos.

Los resultados muestran valores de estabilización de 0.48 Kg/Ha/0.5 h para el nivel de 225 Kg P₂O₅/Ha, 0.81 Kg P/Ha/0.5 h con 450 Kg P₂O₅/Ha y 0.97 Kg P/Ha/0.5 h para 900 Kg P₂O₅/Ha.

La figura 7 muestra que a pesar de presentarse una mayor desorción en los primeros filtrados, la tendencia en todas las curvas fué de estabilizarse alrededor de la 10a. extracción.

3. Fertilización con Superfosfato triple.

Se obtuvo valores de desorción constante de 0.51 - 0.65-0.98 Kg P/Ha/0.5 h para aplicaciones de 225 - 450 - 900 Kg P₂O₅/Ha respectivamente.

La figura 7 muestra el comportamiento de las curvas en cada tratamiento.

E. - FRACCIONAMIENTO Y TRANSFORMACIONES DEL FOSFORO APLICADO.

La tabla 7 presenta las cantidades de cada una de las formas del fósforo extraídas en los tratamientos en que se aplicaron 450 Kg P₂O₅/Ha y el testigo.

Bajo condiciones normales, sin aplicaciones de fósforo, el orden de importancia de las fracciones fué así : P - Orgánico > P - Al > P - Ocluído > P - Ca > P - Fe > P - Fr.

Con la aplicación de 450 Kg P₂O₅/Ha como Calfos se obtuvo un incremento de 78.7 ppm en P - Al, 48.0 ppm en P - Orgánico, 46.2 ppm en P - Ca y 3.7 ppm en P - Fe, el P - Ocluído aumentó en 1.9 ppm. Con superfosfato triple los contenidos aumentaron así : 89.7 ppm en P - Al, 78.7 ppm en P - Orgánico, 30.9 ppm en P - Ca y 11.4 ppm en P - Fe.

La figura 8 permite visualizar los cambios registrados en cada una de las fracciones inorgánicas. Los cambios en P - Total, P - Inorgánico y P - Orgánico se representan en la figura 9.

V. - DISCUSION

A. - RESPUESTA A LA FERTILIZACION.

Las pequeñas diferencias encontradas en primera instancia con el

Tabla 7. Fraccionamiento de fósforo en suelos de Rionegro (Antioquia). Promedio de 3 repeticiones.

Formas de P	0		Tratamientos (Kg P ₂ O ₅ /Ha)		450 - S F T	
	ppm	%	450 - Calfos ppm	%	ppm	%
P - Fr	6.3	0.5	3.0	0.2	3.5	0.2
P - Al	291.3	22.4	370.0	25.8	381.0	25.4
P - Fe	16.3	1.3	20.0	1.3	22.7	1.8
P - Ca	50.8	3.9	97.0	6.6	81.7	5.4
P - Ocluido	70.5	5.4	72.4	4.9	62.5	4.2
P - Inorgánico	435.0	32.5	562.4	38.1	556.3	37.1
P - Orgánico	865.0	66.5	813.0	61.9	943.7	62.9
P - Total	1300.0	100.0	1475.0	100.0	1500.0	100.0

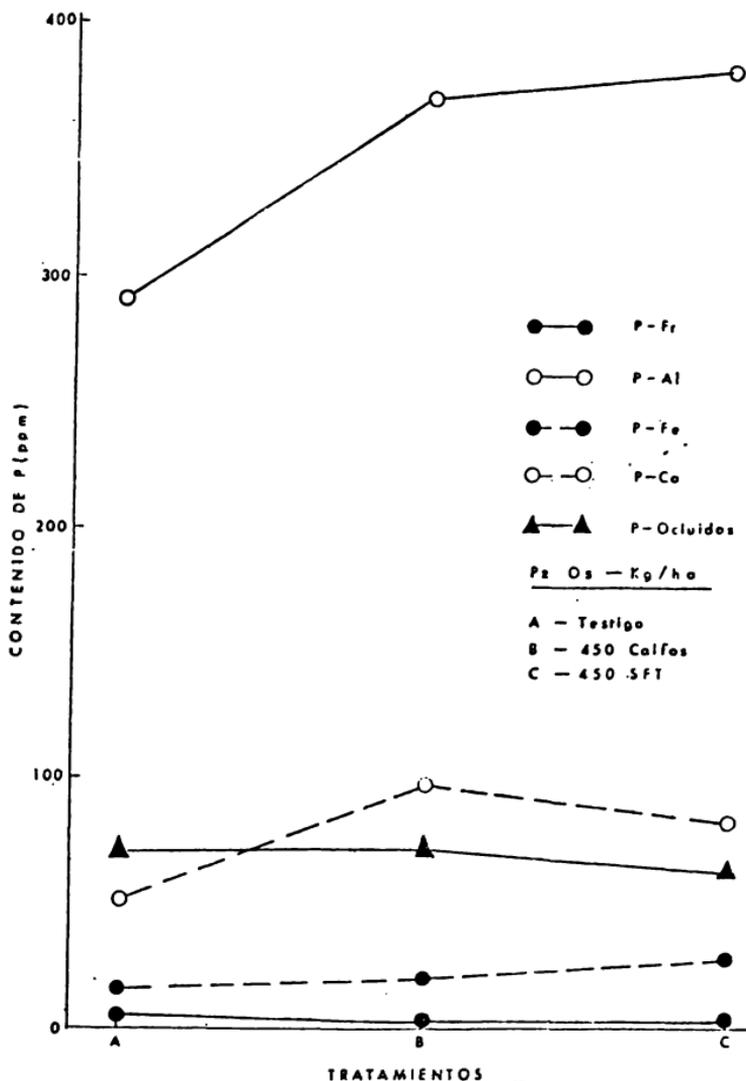


Figura B. Variación de las fracciones inorgánicas del fósforo con la aplicación de fertilizantes fosfatados.

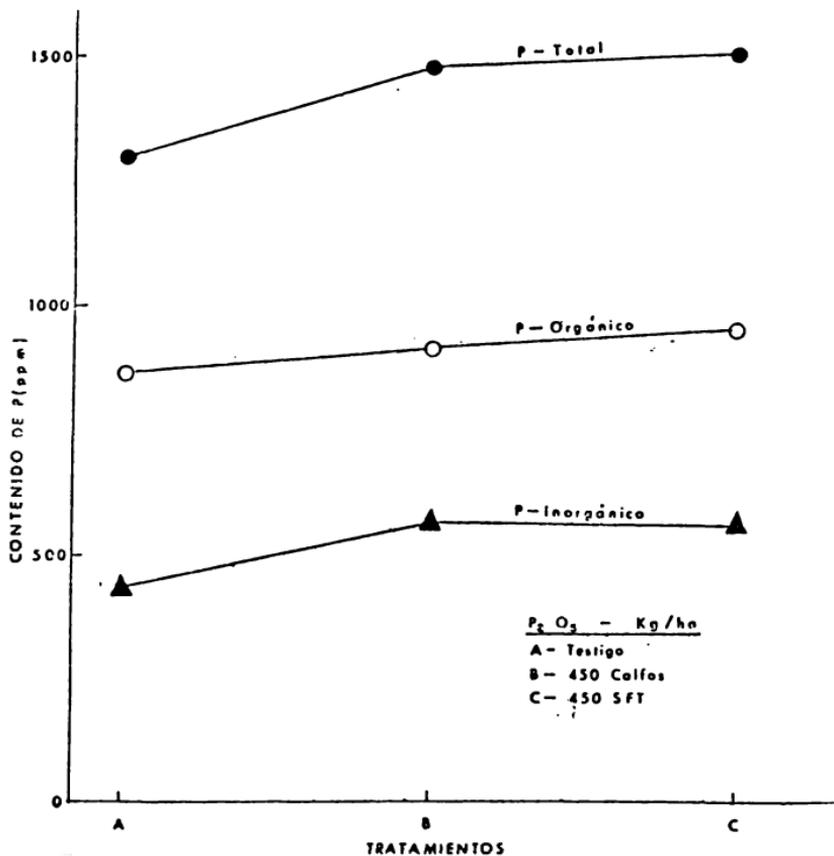


Figura 9. Variación de los contenidos de fósforo con la aplicación de fertilizantes fosfatados.

pasto brasilero (*Phalaris* sp.) muy bien pudieron corresponder a la más rápida solubilidad del superfosfato triple en contra del Calfos considerado como de "lenta disponibilidad".

Los resultados obtenidos con esta gramínea no permitieron emitir un concepto claro sobre sus exigencias de fósforo.

En rábano (*Raphanus* sp.). A pesar de lograrse alguna respuesta, después de una secuencia con pastos es casi imposible tratar de buscar residualidad del Calfos. En parte por la gran cantidad de residuos como raíces que se generan en el pasto y también por la acidez de estos suelos que puede llegar a facilitar una rápida reacción y solubilización del fósforo contenido en el Calfos haciéndolo disponible y susceptible de una rápida fijación.

B.- FIJACION DE FOSFORO

Se suponía que quizás con una alta aplicación de fósforo se podría llegar a tratar de saturar en parte la capacidad de fijación de estos suelos. Los resultados mostraron lo contrario, pues aún al adicionar 800 μ gr de P a un gramo de suelo fertilizado con el equivalente a 900 Kg P_2O_5 /Ha la tasa de fijación no disminuyó.

Esto concuerda con los reportes de León (1964), Monsalve y Lotero (1972), y Sánchez (1974), que dieron cuenta de fijaciones totales aún con aplicaciones de 1000 Kg P_2O_5 /Ha.

Tanto el ensayo de invernadero como las curvas de fijación no mostraron diferencias entre fuentes de fósforo.

Como factores principales se podrían mencionar la alofana que de acuerdo a Wada (1959) presenta una alta superficie específica de adsorción, para formar P - Al ó asociarse con la materia orgánica en compuestos bastante estables. Los sesquióxidos de Fe y Al, León (1967), citado por Sánchez (1974), estarían en menor importancia.

Con la aplicación de CaO se logró reducir el nivel de aluminio intercambiable desde 1.4 meq/100 gr a 0.6 meq/100 gr, antes de determinar las curvas de fijación. Esto ayuda en parte a anular un posible efecto del aluminio libre como factor de importancia en la fijación.

Se hace indispensable desarrollar más trabajos de investigación destinados a una determinación cualitativa y cuantitativa de cada uno de los factores de fijación, su importancia y efecto sobre los fosfatos aplicados en base a los productos de formación.

Alternativas económicas para el uso de fertilizantes fosfatados po-

drían consistir en aplicaciones localizadas (banda ó gránulos), utilización directa de rocas fosfóricas ó aplicaciones fraccionadas de acuerdo al desarrollo de los cultivos a considerar en base a niveles externos críticos a establecer para la zona.

C. - LIBERACION DE FOSFORO

Según Dawgthrey y colaboradores (1971), suministros de fósforo a la solución del suelo desde la fase sólida menores de 0.6 Kg P/Ha/0.5 h son insuficientes para un abastecimiento potencial a las plantas. Los valores de estabilización obtenidos con el testigo y 225 Kg P₂O₅/Ha como Calfos y superfosfato triple estuvieron por debajo de este límite. Aplicaciones mayores mostraron valores próximos al límite de 1.0 Kg P/Ha/0.5 h considerado como adecuado.

Sin embargo, es de anotar que aún así, el desarrollo y producción de las plantas indicadoras fué bastante pobre.

Los resultados obtenidos por Gutiérrez y Rendón (1974), con aplicaciones de 300 Kg P/Ha fueron bastante bajos, (0.24 Kg P/Ha/0.5 h). Esta diferencia detectada para suelos de la misma zona bien pudo ser debida al producto aplicado por ellos (fosfato dicálcico) ó a la utilización de un factor biológico (planta indicadora) inmovilizador del fósforo contenido en el fertilizante.

La absorción por plantas principalmente en la primera fase (Phalaris sp.) se cree inmovilizó algunas cantidades de fósforo a nivel de las raíces. Con su posterior incorporación y utilización del suelo con rábano (Raphanus sp.) por espacio de 70 días no se logró una completa mineralización del P - Orgánico facilitándose posiblemente su desorción cuando se saturó el suelo con agua, afectando así la tasa de liberación constante. Los valores un poco altos de P-Ca obtenidos en el fraccionamiento de la fase inorgánica, su poca estabilidad en condiciones de alta acidez pudieron también incidir en este proceso.

Islam y Ahmed (1973), en suelo de la India encontraron que a altos contenidos de humedad del suelo, la concentración de fósforo disminuía notoriamente. Furukawa y Kawaguchi (1969) en arroz de secano en un lapso de dos semanas reportaron una rápida hidrólisis del P-Inositol, componente principal del P - Orgánico.

Lo anterior se podría aplicar al trabajo realizado en laboratorio, donde el suelo se mantuvo inundado y con un flujo de decantación continuo por más de 24 horas.

D. FRACCIONAMIENTO DE FOSFORO Y TRANSFORMACIONES

El contenido de fósforo total de 1300 ppm determinado en el testigo concuerda con los valores registrados para suelos derivados de cenizas volcánicas en otras latitudes del trópico americano, Borne - misza y Morales (1969) citados por Ospina (1974), Kamprath (1974), González (1970). Se aproxima al encontrado por Sánchez (1974) en un suelo de la Selva (Rionegro), pero difiere bastante de las 710 ppm, promedio de 21 perfiles, reportados por Fassbender y Tschinkel (1974) en la zona de estudio.

Los porcentajes para P - Orgánico de 66.5% no concuerdan con la apreciación general de Kamprath (1974), según él, en suelos de cenizas volcánicas hay predominancia de la fracción inorgánica. Se presentó bastante similitud con los datos del departamento de Nariño dados por Benavides (1975) y Sánchez (1974). Nuevamente se presentaron contradicciones con Fassbender y Tschinkel.

Quizás las unidades geomorfológicas donde realizaron el estudio no concuerdan con la unidad en donde se realizó el muestreo para el trabajo presente. Esto podría explicar las diferencias que se dieron.

El porcentaje del 22.4 % como P - Al resultó más alto de lo esperado y contrario a lo anotado por Morillo y Fassbender (1968), Kamprath (1974), Fassbender y Tschinkel (1974).

Los P - Ca presentaron contenidos relativamente altos en base a la edad y naturaleza de los depósitos volcánicos, Hermelín (1974) y las características de estos suelos Fernández y Santa (1964).

Cuando se aplicó fertilizantes, las fracciones "más favorecidas" en su orden fueron : P - Al > P - Orgánico > P - Ca > P - Fe. Esto podría tener una explicación en los altos contenidos de alofana de estos suelos. Un poco extraña la mayor actividad del calcio sobre el hierro, posiblemente en un primer período debido a la aplicación de correctivos y al calcio contenido en los fertilizantes se facilita una reacción temprana de este elemento con el ácido fosfórico. Con el tiempo, las condiciones de acidez de estos suelos que no permiten mayor estabilidad de los P - Ca puede ocasionar una "migración" hacia P - Al ó P - Fe.

La alta solubilidad del superfosfato triple permite inferir que en un corto período el suelo está en capacidad de suministrar cantidades mayores de fósforo a las plantas como lo demuestra el primer corte de pasto brasilero. De esta forma, inicialmente se puede contrarrestar en parte la acidez del Al y Fe. Esto se observó en una forma cualitativa principalmente en un mejor desarrollo radicular.

Sin embargo, una vez agotado el fósforo fácilmente disponible, las plantas no aumentaron su producción de materia seca en la parte aérea en las cosechas siguientes.

Este fósforo inmovilizado se cree pasó a la fracción orgánica, para formar posteriormente en el proceso de descomposición compuestos organo - alofánicos bastante estables.

Se hace necesario en futuros trabajos, acortar los períodos o tiempos de duración de los procesos mediante muestreos de suelo para determinar con más precisión las tasas de cambios y cuantificar sus productos de reacción.

VI.- CONCLUSIONES

- 1.- Los trabajos de invernadero no permitieron establecer un nivel óptimo de fertilización para el pasto brasilero (Phalaris sp.) y rábano (Raphanus sp.).
- 2.- La capacidad de fijación de fósforo en todos los tratamientos fué mayor del 95%, y cercana al 100%.
- 3.- Aún con aplicaciones altas de fósforo el factor "intensidad" ó tasa de suministro potencial se mantuvo por debajo de los niveles considerados como óptimos.
- 4.- La fertilización con Calfos no presentó incrementos en las tasas de desorción constante de fósforo con respecto al testigo y al superfosfato triple.
- 5.- El orden de importancia de las fracciones de fósforo en suelo sin fertilización fué así: P - Orgánico > P - Al > P - Ocluído > P-Ca > P - Fe > P - Fr.
- 6.- Al aplicar fertilizantes el orden de importancia de los productos de formación fué: P - Al > P - Orgánico > P - Ca > P - Fe.
- 7.- Gran parte de la fijación de fósforo por estos suelos se debe principalmente a la presencia de altos contenidos de alofana, al contenido de aluminio en élla y a la inmovilización por la materia orgánica.

VII. BIBLIOGRAFIA

- BENAVIDES, G. de., 1975, Fraccionamiento de fósforo en suelos derivados de cenizas volcánicas del Departamento de Nariño, Colombia. In: V Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo., IV Coloquio Nacional sobre Suelos, Resúmenes, Medellín, Colombia.

- BLASCO, M., 1974, El fósforo orgánico y su metabolismo en los suelos: Suelos Ecuatoriales, Soc. Col. Ciencia del Suelo, III Coloquio sobre Suelos, 6 (1): 19-43.
- BORNEMISZA, E., 1966, El fósforo orgánico en suelos tropicales: Turrialba, 16: 33 - 38.
- CHANG, S.C., and M.L. JACKSON., 1958, Fractionation of soil phosphorus: Soil Science, 84 : 133 - 144.
- DAWGHTREY, Z.W.; J.W. GILLIAM; and E. J. KAMPRATH., 1971, Phosphorus supply characteristics of acid organic soils as measured by desorption and mineralization: Soil Science, 115 : 18 - 24.
- ESPINAL, L.S., 1964, Formaciones vegetales del Departamento de Antioquia: Rev. Facultad Nacional de Agronomía, Medellín, .24 : 1 - 83.
- FASSBENDER, H.W., 1975, Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina: Turrialba, IICA, Costa Rica, 398 p.
- FASSBENDER, H.W. y H. TSCHINKEL., 1974, Relación entre el crecimiento de plantaciones de Cupressus lusitánica y las propiedades de los suelos derivados de cenizas volcánicas: Turrialba, 24: 141 - 149.
- FASSBENDER, H.W., 1969, Deficiencias y fijación del fósforo en suelos derivados de cenizas volcánicas de Centroamérica: In IICA, Panel sobre suelos derivados de cenizas volcánicas en América Latina, Turrialba, Costa Rica. 134: 1 - 10.
- FASSBENDER, H. W. et al., 1968, Estudio del fósforo en suelos de América Central: II formas y su relación con las plantas, Turrialba, 18: 335 - 347.
- FASSBENDER, H.W., 1966, Formas de los fosfatos en algunos suelos de la zona oriental de la Meseta Central y de las Llanuras Atlánticas de Costa Rica: Fitotecnia Latinoamericana, 3: 187 - 202.
- FERNANDEZ, F. y N. SANTA, 1964, Estudio general de suelos del Oriente Antioqueño: Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá, Departamento Agrológico, LG - 4: 1 - 93.
- FURUKAWA, H., and KAWAGUCHI, K., 1969, Contribution of organic phosphorus to the increase of easily soluble phosphorus in waterlogged soil, especially in relation to phytin phosphorus (inositol hexaphosphate): Soil Sci. Plant Nutrition, 15: 243 - 250.

- GONZALEZ, S., J.A., 1970, Evaluación de la fijación y disponibilidad del fósforo en 14 series de suelos de Guatemala: Tesis. Ing. Agrónomo, Guatemala, Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos. 31 pp.
- GUERRERO M., R, 1974, La fertilización fosfórica en cultivos de clima frío. Suelos Ecuatoriales: Soc. Col. de la Ciencia del Suelo, III Coloquio sobre Suelos, 6 (1): 179 - 223.
- GUERRERO R., R., 1974, Formas de fósforo y sus relaciones con la fertilidad de los suelos: Suelos Ecuatoriales, Soc. Col. Ciencia del Suelo, III Coloquio sobre Suelos, 6 (1): 349 - 387.
- GUNARY, D., 1970, A new adsorption isotherm for phosphate in soil : J. Soil Science, 21 : 72 - 77.
- GUTIERREZ P., E. y E. RENDON A., 1974, Liberación del fósforo en tres suelos colombianos: Tesis. Ing. Agrónomo, Medellín, Facultad de Ciencias Agrícolas, 62 p (a máquina).
- HERMELIN, M., 1973, Depósitos y actividad volcánica cuaternaria en el norte de la Cordillera Central: Suelos Ecuatoriales, Soc. Col. Ciencia del Suelo, 5 (1): 43 - 60.
- HELYAR, K. R. and D. N. MUNNS., 1975, Phosphate fluxes in the soil - Plant - System : A computer simulation : Hilgardia, 43 : 103 - 130.
- HGU, P.H., 1965, Fixation of phosphate by aluminium and iron in acidic soils: Soil Science, 99 : 398 - 402.
- INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO, ICA., 1973, Experimentos realizados en la subestación La Selva: Medellín, Antioquia, 17 p.
- ISLAM, A. and B. AHMED., 1973, Distribution of inositol phosphates, phospholipids, and nucleic acids and mineralization of inositol phosphates in some Bangladesh soils: Jour. Soil Science, 24: 193-198.
- KAMPRATH, E.J., 1974, Aspectos químicos y formas minerales del fósforo del suelo en regiones tropicales: Suelos Tropicales, Soc. Col. Ciencia del Suelo, III Coloquio de Suelos, 4 (1): 1 - 18.
- KURTZ, L., 1946, Phosphate adsorption by Illinois soils: Soil Science, 61 : 111 - 124.
- LARSEN, S. 1967, Soil Phosphorus: Advances in Agronomy, 19 : 151 - 209.

- LEON, L.A., 1964, Estudios químicos y mineralógicos de diez suelos colombianos: *Agricultura Tropical (Colombia)*, 20: 442 - 452.
- LOPEZ, M., 1960, Valoración de las formas del fósforo, orgánico e inorgánico, de un suelo de la zona cafetera: *Cenicafé*, 11: 189-204.
- MONSALVE, S. A. y J. LOTERO, 1972, Efecto residual de un suelo negro de Antioquia: *Revista I C A*, 7 : 159 - 171.
- MORILLO, M. R. y H. W. FASSBENDER., 1968, Formas y disponibilidad de los suelos en la cuenca baja del Río Choluteca, Honduras: *Turrialba*, 18 : 26 - 33.
- OSPINA L., O., 1974, El fósforo en los andosoles: *Suelos Ecuatoriales, Soc. Col. Ciencia del Suelo, III Coloquio de Suelos*, 6 (1) : 97 - 136.
- PROBERT, M.E., 1972, The dependence of isotopically exchangeable phosphate (L - value) on phosphate uptake: *Plant and Soil*, 36 : 141-148.
- SANCHEZ, L. F., 1974, Influencia de enmiendas sobre la fijación de fósforo en tres suelos colombianos: Tesis. M. Sc. Universidad Nacional - I C A, Bogotá, Colombia. 115 p.
- VALLEJO S., E. y A. ARAQUE D., 1974, Efecto del aluminio intercambiable sobre la fijación del fósforo en andosoles y latosoles: Trabajo de Investigación, Ing. Agrónomo, Medellín, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Nacional, 90 p.
- WADA, K., 1959, Reaction of phosphate with allophane and halloysite : *Soil Science*, 87 : 325 - 330.