

ntro Internacional de Agricultura Tropical

07-77
e. 2

Serie SE-07-77

1 Julio 77

BIBLIOTECA

12 JUL 1977

EL USO DE ROCAS FOSFORICAS EN SUELOS ACIDOS DEL TROPICO AMERICANO

Luis Alfredo León S.
//

RESUMEN

Una gran proporción de los suelos del trópico presentan reacción ácida, bajos contenidos de fósforo asimilable por las plantas y alta saturación de aluminio intercambiable. Generalmente su capacidad de retención de fósforo es alta y la tasa de recuperación por las plantas de los fertilizantes fosfatados aplicados es muy baja, de tal forma que para obtener buenos rendimientos de cultivos semestrales o anuales es necesario efectuar aplicaciones de fósforo en cantidades relativamente altas.

En la actualidad, el uso de los fertilizantes con un alto contenido de fósforo se encuentra muy restringido debido en parte a su elevado costo, de manera que muchísimo menos resultará económico tratar de saturar la capacidad de retención del fósforo por los suelos mediante el uso de fuentes solubles de este elemento. Si embargo el uso de fuentes de fósforo de menor costo, tales como las rocas fosfóricas, las escorias básicas y las alteraciones térmicas o químicas de las rocas, pueden ofrecer oportunidades de suplir los requerimientos de fósforo con una menor inversión. Por otra parte, es posible que resulte económica su adición buscando diferentes métodos de aplicación y mezclas con materiales

44163

formadores de ácidos así como también ayudados por la aplicación de cal y silicatos. En adición, existe la alternativa del uso de especies o variedades que se adapten a suelos bajos en fósforo o que puedan tomarlo de fuentes poco solubles ya sea directamente o mediante inoculantes con microorganismos como la mycorrhiza Endogone.

En varios países de Latinoamérica tales como Brasil, Perú y Colombia se está ensayando la aplicación directa al suelo de rocas fosfóricas y desde hace pocos años se han iniciado estudios serios para la explotación de las minas y la transformación de dichas rocas, con el fin de poder ofrecer a los agricultores y ganaderos fuentes más económicas de fósforo.

Con el fin de determinar el valor como fertilizante de las rocas fosfóricas directamente aplicada al suelo, se han realizado durante los últimos años un buen número de ensayos de invernadero y campo, pero los resultados han sido muy variables. Sin embargo se puede afirmar que la aplicación directa de rocas fosfóricas altamente reactivas en suelos ácidos, cuando estas se encuentran finalmente molidas, pueden producir respuestas aceptables para muchos cultivos, posiblemente debido en parte a que su baja y lenta solubilidad las hace menos susceptible de que el fósforo que contienen sea rápidamente fijado por el suelo.

Más recientemente se ha reconocido que todas las rocas no son iguales y que un factor importante que determina la respuesta de los cultivos a su aplicación directa es la mineralogía de las mismas y la reactividad asociada a ellas. Si una roca fosfórica es altamente reactiva, ésta podrá mantener en la solución del suelo concentraciones de fósforo suficientes para producir rendimientos económicamente aceptables, pero no es posible evaluarla como fertilizante por medio de los

resultados de un solo cultivo de término corto pues el efecto residual de la aplicación de rocas fosfóricas es mayor que aquel producido por fuentes más solubles.

Desafortunadamente muchos de los experimentos realizados con rocas fosfóricas no incluyen información sobre su solubilidad y mucho menos sobre su caracterización mineralógica. En la mayoría de los casos tampoco se encuentran datos sobre evaluación de las reacciones producidas en el suelo. Por esta razón, es muy difícil realizar una evaluación adecuada de las relaciones entre la fuente de fósforo y su efectividad agronómica y predecir las respuestas de las plantas a las aplicaciones directas de rocas fosfóricas bajo diferentes condiciones ecológicas.

Por tal motivo, en la actualidad se están desarrollando investigaciones en el CIAT, en Colombia y en otros países como Brasil y Perú, cuyos objetivos son los de utilizar ensayos de invernadero y campo para evaluar la efectividad agronómica de las rocas fosfóricas de fuentes que varían en mineralogía, observar las reacciones del suelo asociados con la aplicación directa de estas rocas y relacionar los resultados obtenidos con el fin de establecer criterios para seleccionar rocas fosfóricas que produzcan los mejores resultados por su aplicación directa.

EL USO DE ROCAS FOSFORICAS EN SUELOS ACIDOS DEL TROPICO AMERICANO

Luis Alfredo León S.

Suelos ácidos de los trópicos

En general, los suelos ácidos, cuando su pH es menor de 5.5, presentan problemas de manejo que dificultan el desarrollo de una agricultura económicamente exitosa. Entre estos problemas se encuentran la toxicidad del aluminio y/o manganeso y la baja disponibilidad de elementos esenciales para las plantas tales como el fósforo, el calcio y el magnesio. Fuera de que estos suelos tienden a ser extremadamente deficientes en fósforo, generalmente contienen relativamente altas concentraciones de formas reactivas de hierro y aluminio, que hacen que las formas solubles de fósforo reaccionen y se transformen en otras menos solubles y poco aprovechables por las plantas. Este fenómeno, llamado fijación, es quizás uno de los más importantes en los suelos ácidos y que actualmente impide el desarrollo de grandes zonas arables del mundo que se encuentran prácticamente sin uso (25).

De acuerdo con Sanchez y Uehara^{1/}, los suelos ácidos que fijan grandes cantidades de fósforo son invariablemente de textura media o fina, altos en óxidos o hidróxidos de hierro y aluminio. Según estos autores, hay varios grandes grupos de suelos cuya capacidad de fijación de fósforo es muy alta. Ellos son los de ordenes Oxisol y Ultisol, suborden Andepts y ciertos Inceptisoles y Alfisoles rhódicos u óxicos. Se excluyen suelos clasificados dentro de estas categorías cuyo horizonte superficial tenga una textura arenosa.

A pesar de que no es posible identificar en detalle las áreas donde estos suelos

1/ Sanchez, P. A y G. Uehara. Management considerations for acid soils with high phosphorus fixation capacity. (por publicar)

altamente fijadores de fósforo son dominantes, la figura 1 nos da una idea de la magnitud y localización en el mundo de dichas áreas. El mapa que indica la distribución de los Andepts, Oxisoles y Ultisoles está basado en una compilación hecha por Sanchez y Uehara^{1/} utilizando mapas de servicio de conservación de suelos de los Estados Unidos y porciones publicadas del Mapa de Suelos del Mundo de Fao y Unesco.

Como puede verse, los Oxisoles ocupan una gran área de Suramerica y Africa Central y los Ultisoles grandes extensiones del sureste de los Estados Unidos, Mexico, América Central, Suramerica, Africa y Asia Suroriental.

Apesar de que los Andepts no ocupan en el trópico áreas tan extensas como los Oxisoles y Ultisoles, son de gran importancia debido a que están localizados en áreas de producción de cultivos tales como trigo, cebada, maíz y papa. En estas áreas se encuentra localizada una apreciable proporción de la población de algunos de los países del trópico americano.

Respuesta al fósforo

Investigaciones realizadas en varios países de América tropical señalan al fósforo como uno de los elementos más limitantes para el crecimiento de las plantas en suelos generalmente ácidos y en su mayoría clasificados como Andepts, Oxisoles ó Ultisoles (3).

^{1/} Sanchez, P. A. y G. Uehara. Management considerations for acid soils with high phosphorus fixation capacity. (por publicar)

En Colombia, es necesario añadir fertilizantes fosfatados para obtener rendimientos económicamente aceptables de cultivos tales como trigo, maíz, papas y hortalizas cuando estos se siembran en Andosoles predominantes en las cordilleras Andinas (13). En casi todos los casos las dosis óptimas se encuentran por encima de 100 kg P_2O_5 /ha y para papa u hortalizas la dosis puede llegar a más de 300 kg P_2O_5 /ha.

En los Llanos Orientales, donde predominan los Oxisoles o Inceptisoles de carácter óxico, es necesario adicionar cantidades considerables de fósforo para que puedan crecer cultivos como arroz, caupi y maíz (5). También es necesario adicionar fósforo con el fin de obtener un establecimiento aceptable de pastos mejorados (7).

Experimentos realizados en la zona andina del Perú han mostrado que el uso del fósforo aumenta con los rendimientos de papa entre un 55 y un 220% y los de trigo de un 27 a más de un 1000%^{1/}. Los informes anuales sobre investigaciones agro-económicas en suelos tropicales del Departamento de la Ciencia del Suelo de la Universidad del Estado de Carolina del Norte (21, 22), indican que la Selva Amazónica del Perú, donde predominan los Ultisoles, la combinación más prometedora para el establecimiento del Panicum maximum es la de 2 ton

1/ Davelouis J. y M. Cano. 1976. Avances de las Investigaciones realizadas a través del convenio Fos-Bayovar durante las campañas 1974-1975 y 1975-1976. (sin publicar)

de Cal/ha y 25-50 kg de P/ha/año. La dosis óptima para maíz, resultó estar cerca a los 50 kg P_2O_5 /ha.

Desde Noviembre de 1972 se ha estudiado el efecto residual del fósforo al voleo y en banda aplicado a un oxisol del Cerrado en Brasil (27).

Los resultados de este experimento a largo plazo mostraron que 160 kg P_2O_5 /ha fué el tratamiento más prometedor para el primer cultivo de maíz. Para el caso de cuatro cultivos continuos de maíz la más alta tasa de retorno y el mayor retorno absoluto a la fertilización se obtuvieron con 320 kg P_2O_5 /ha aplicado al voleo inicialmente y 80 kg P_2O_5 / en banda con cada siembra.

Si, como se vé en los pocos ejemplos registrados arriba, el éxito de una empresa agrícola en los trópicos americanos depende en parte del fósforo que se añada al suelo, los puntos críticos estarán concentrados en los precios del elemento y el costo del transporte. El alto precio de fertilizantes tales como superfosfato simple y triple y el alto costo del transporte, hace que los márgenes de ganancia se reduzcan a niveles marginales. La solución a este problema podría estar en el uso de fuentes de fósforo más baratas tales como las rocas fosfóricas obtenidas en minas relativamente cercanas a los sitios de consumo, donde los gastos de energía para transformarlos se reducirían a una adecuada molienda. Otras alternativas que ayudarían a reducir el costo del fósforo aplicado estarían basados en adiciones masivas de rocas fosfóricas al suelo buscando efectos residuales por muchos años en combinación con bajas aplicaciones semestrales o anuales de fosfatos solubles,

ó en mezclas de estas rocas con productos formadores de ácidos que ayudaran a solubilizar más rápidamente el fósforo de las mismas. Paralelamente se deberá buscar la manera de transportar fertilizantes a los sitios de consumo en forma más económica.

Depósitos de rocas fosfóricas en el trópico americano

Hasta hace pocos años, las industrias de fertilizantes de América Latina dependían en su gran mayoría de los suministros de rocas fosfóricas concentradas y ácido fosfórico, superfosfato triple ó fosfatos de amonio provenientes de los Estados Unidos y Norte del Africa. Dichas industrias, generalmente utilizan la roca concentrada ((30-32% de P_2O_5 total) para fabricar superfosfatos simple o triple y fertilizantes compuestos con relaciones N- P_2O_5 - K_2O generalmente del tipo 1-1-1, 1-2-2 y 1-3-1.

Debido al reciente incremento en el precio internacional del fósforo y a la escasés que se presentó a principios de la actual década, varios países latinoamericanos se vieron en la necesidad de incrementar la búsqueda en su territorio depósitos de rocas fosfóricas con el fin de estudiar su explotación para utilizarlas en forma directa o transformada y concentrada mediante procesos fisicoquímicos conocidos.

Por causa de este creciente interés, actualmente es posible encontrar información sobre depósitos de rocas fosfóricas en algunos países de Latinoamérica. En la figura 2 se indican los depósitos más importantes, conocidos hasta el presente (19, 4)^{1/}.

^{1/} Localización de depósitos de Perú y Venezuela tomado de mapas sin referencia.

En el caso del Brasil, la tabla 1 nos muestra más en detalle las características de las diversas minas de roca fosfórica y otras fuentes de fósforo que se encuentran en ese país. Recientemente el ministerio de Minas y Energía divulgó algunos pormenores de la reserva descubierta en el municipio de Patos de Minas. La mina en mención se estima que puede superar a todo lo que se conoce en el Brasil, incluyendo a la apatita de Araxá. Suponiendo una concentración promedio de 10% P_2O_5 , se cree que es posible obtener un total de 45 millones de toneladas de fósforo como P_2O_5 (19).

En Colombia, de acuerdo con la tabla 2, se encuentran minas de roca fosfórica en seis localidades de las cuales las más importantes parecen ser las de Sardinata, Pesca y Tesalia. La única mina que se encuentra actualmente en explotación es la de Tesalia (Huila), donde la empresa Fosfatos Colombianos está produciendo roca molida y superfosfato simple del 14% P_2O_5 a partir de ésta. La mina de La Cascajera fué beneficiada por el Instituto de Fomento Industrial y la roca vendida como Fosforrica 22. Actualmente esta mina se encuentra clausurada (4). Es muy posible que en un próximo futuro se inicie la explotación de las minas de Sardinata y Pesca. La primera se podría utilizar para concentrarla y transformarla en las plantas de fertilizantes de Abocol y Monómeros Colombo-Venezolanos. La segunda se piensa moler finamente para usarla aplicada directamente al suelo (1).

La única fuente conocida de fósforo en el Ecuador es el Guano depositado en un gran número de islas. Entre ellas se encuentra El Pelado (20% P_2O_5), Los Farallones (17% P_2O_5), Santa Clara (14% P_2O_5) y La Plata^{1/}.

^{1/} Información impresa sin referencia.

En el Perú, la única fuente importante conocida de fósforo antes de 1958 eran los extensos depósitos de Guano a lo largo de la costa del Pacífico. Después de ese año se ha activado crecientemente el interés por los grandes depósitos del desierto de Sechura (Bayovar), donde actualmente se está explotando un rico yacimiento que produce roca fosfórica de alta reactividad y elevado porcentaje de P_2O_5 /ha ($\sim 30\%$).

Se han reportado por otra parte en varias provincias (Loreto, Junín) cantidades menores de fosfatos sedimentarios y más recientemente hay algún interés en la posibilidad de recuperar módulos fosfóricos del fondo del mar en varios puntos de la costa. No se ha reportado la presencia de apatita de origen ígneo o metamórfico^{1/}.

Uso de rocas fosfóricas

Existen dos grandes alternativas para la utilización de rocas fosfóricas:

- 1.- Tratarlas térmica o químicamente para obtener fertilizantes con una alta concentración de fósforo y que además el elemento se convierte en formas más aprovechables por las plantas.
- 2.- Aplicarlas molidas directamente al suelo. En este artículo presentaremos muy someramente la primera alternativa y haremos énfasis en la segunda.

Uso de rocas fosfóricas para producir fertilizantes de alto contenido de fósforo

Las rocas fosfóricas se pueden tratar térmicamente en horno eléctrico con el fin de obtener ácido fosfórico o fundirlas a $1550^{\circ}C$ junto con minerales a base de

^{1/} Información impresa sin referencia.

silicato de magnesio (serpentina) para obtener un fertilizante denominado fosfato de magnesio fundido. Los dos procesos requieren altas inversiones y elevados costos de producción (1).

Los procesos químicos generalmente consisten en tratamientos con ácidos. Al tratar la roca con ácido sulfúrico se puede obtener el superfosfato simple, el cual es sencillo fabricarlo en pequeñas plantas y con bajos costos de producción por unidad de fósforo. En este caso los principales problemas son el bajo contenido de P_2O_5 del producto final y la poca disponibilidad de ácido sulfúrico que depende de las reservas de azufre ó de petróleo del respectivo país.

Al tratar la roca finamente molida y previamente tratada, para removerle las sustancias extrañas ó para elevar la concentración del fósforo, con ácido sulfúrico, se puede obtener ácido fosfórico del 28-30% de P_2O_5 . El ácido fosfórico se utiliza para la obtención de fosfatos de amonio y superfosfato triplé. Este último se produce en forma similar al superfosfato simple pero utilizando ácido fosfórico para tratar la roca en lugar de ácido sulfúrico. En este caso se presentan los mismos problemas que en la preparación del superfosfato simple pues depende del suministro del azufre.

La roca fosfórica se puede tratar también con ácido clorhídrico para obtener ácido fosfórico. Aquí los problemas son la separación del cloruro de calcio que se forma y la corrosión de los equipos. El costo de la planta es muy alto y solamente se puede pensar en utilizar este ácido cuando se consigue como subproducto del procesamiento de la sal.

Si se trata la roca con ácido nítrico se producen los nitrofosfatos que son una mezcla de nitratos y fosfatos. Aquí se requiere de amoníaco para producir ácido

nitrico. Este proceso solo será factible donde se cuente con gas natural ó con varios subproductos del petroleo.

Recientemente se han podido obtener nuevos productos como los polifosfatos de amonio y mezclas granuladas de algunos fertilizantes existentes. Entre estos se encuentran el fosfato urea-amonio, el sulfato de amonio-fosfato y nitrato de amonio fosfato. Como fertilizantes potenciales se encuentran el fosfato diamónico de alto grado (18-46-0) y el de grado limite (14-73-0). Los mas promisorios son la hexamida fosfonitrilica monohidratada ($P_3N_3 \cdot (NH_2)_6H_2O$), con grado 50-85-0 y la fosforil triamida (44-75-0). Apesar de que algunos de estos nuevos fertilizantes tienen un mayor grado y sus características de manejo son buenas, generalmente no resultan superiores a los superfosfatos en cuanto a la respuesta de los cultivos por unidad de fósforo aplicada) (20).

Aplicación directa de rocas fosfóricas al suelo

La literatura relacionada con el uso de diferentes fuentes de fósforo es escasa en America Latina y muy abundante en otras regiones del mundo, principalmente en los Estados Unidos (11) y en Europa (27).

Una buena revisión y discusión sobre las investigaciones realizadas con rocas fosfóricas en los Estados Unidos ha sido realizada por Ensminger, Pearson y Arminguer (11). Las aplicaciones directas de rocas fosfóricas han sido más efectivas en el caso de suelos ácidos muy bajos en fósforo aprovechable. Ciertos cultivos tales como leguminosas, trigo sarraceno y nabo silvestre pueden utilizar el fósforo de las rocas fosfóricas en forma más efectiva que los cereales, el maíz, y las verduras. Sin embargo, en suelos fuertemente ácidos y muy deficientes

en fósforo, casi todos los cultivos han mostrado algún grado de respuesta a las rocas fosfóricas. En general, los rendimientos obtenidos con el uso de roca fosfórica son más bajos que aquellos encontrados al utilizar fosfatos solubles, aún en el caso en que la cantidad de fósforo aplicado como roca sea mucho mayor que el adicionado como fosfato soluble^{1/}.

Trabajos realizados en Europa (27), indican que en suelos ácidos los rendimientos de pastos fueron casi del mismo orden de magnitud cuando se utilizaron rocas fosfóricas finamente molidas, hiperfosfato típico y escorias básicas, aplicadas en base a cantidades iguales de P_2O_5 total. En dos ensayos a largo plazo (6 y 7 años de adiciones de fertilizantes y 10 años de efecto residual) los rendimientos del hiperfosfato en total fueron 22.4% mayores que aquellos producidos por las escorias básicas.

Ensayos efectuados recientemente en un Latosol Rojo Oscuro del Brasil (Cerrado) con Brachiaria decumbens y Stylosanthes humilis (21), han mostrado la fuerte influencia de la cantidad y calidad del fósforo aprovechable en el establecimiento y crecimiento temprano de las dos plantas forrajeras. El superfosfato ordinario, el termofosfato (fusión de roca y mineral de magnesio), y el hiperfosfato dieron buena respuesta de crecimiento temprano en las dos especies. En la fase de establecimiento la aprovechabilidad del fósforo de la roca de Araxá (roca natural, finamente molida), fué un factor severamente limitante.

Sin embargo, los resultados de este mismo ensayo con Brachiaria decumbens durante la estación lluviosa de 1974-1975 (22), mostraron que la roca fosfórica de Araxá, de

1/ Doll, E. C. Utilization of Phosphate rock for direct application to soils. International Fertilizer Development Center (mimeografiado).

baja solubilidad, está aumentando en aprovechabilidad con el tiempo y es posible que a largo plazo resulte competitivamente económica con relación a las fuentes mas solubles (Figura 3).

Hasta hace algunos años fué muy poca la investigación que se realizó en Colombia para comparar fuentes de fertilizantes fosfatados. Experimentos en invernadero realizados por Rodriguez y Lotero (24), indicaron que para los suelos negros orgánicos de Antioquia la roca fosfórica de Turmaqué produjo los más bajos rendimientos en lechuga romana, en contraposición con en fosfato bicálcico y las escorias Thomas. El fosfato de amonio y el superfosfato triple produjeron rendimientos intermedios entre las fuentes antes mencionadas.

McCormick y Galiano (17), encontraron que en suelos humíferos ácidos de la sabana de Bogotá la papa produjo más altos rendimientos con superfosfato triple que con Escorias Thomas. Con este mismo cultivo, en suelos de origen volcánico del municipio de Manizales, Ortiz y Rubio (23), encontraron que los mejores resultados se obtienen con fosfato de amonio y superfosfato triple, siguiéndoles en orden descendente el 10-30-10, las escorias Thomas y la roca fosfórica.

Nichiellin, León y Ramirez (18), realizaron ensayos con elefante (Pennisetum purpurem, Schumach) en Popayan y Santa Rosa de Cabal, pangola (Digitaria decumbens, Stent.) en Popayan, Angleton (Dichantium aristatum (por C.E. Hubbard) en el Estrecho, Valle del Patia y trenza (Paspalum notatum, Fluegge) en Timba, Valle del Cauca, comparando el efecto del superfosfato triple con escorias Thomas y las rocas de Turmequé y Huila (Colombia) y Florida (Estados Unidos). De los resultados obtenidos concluyeron que en todos los sitios la mejor fuente de P fué el superfosfato, seguido

de las escorias Thomas, siendo estos dos superiores a las rocas fosfóricas. Con las aplicaciones de estos últimos y de las escorias Thomas se notó un ligero aumento en el contenido de Ca intercambiable del suelo y una tendencia a disminuir el Al.

En el caso de cultivos semestrales han sido pocos los ensayos realizados. Howeler (15), reporta la respuesta del arroz de riego a varios niveles y fuentes de P en un suelo de la altillanura plana de los Llanos Orientales (Carimagua). En este ensayo las mejores fuentes fueron el superfosfato triple y la roca fosfórica de Carolina del Norte. Las intermedias resultaron ser las rocas de Florida Central e Idaho, y aquellas que dieron las más bajas producciones fueron las rocas nacionales de Turmequé (Fosforrica-22) y Huila (Fosfor-Quin).

El mismo autor (5) realizó un ensayo con frijol (Tui) en La Zapata (suelo ácido del Valle del Cauca), donde los rendimientos aumentaron de 0.7 a 1.8 ton/ha. con la aplicación en banda de 200 kg de P_2O_5 /ha en forma de superfosfato triple. Las escorias Thomas fueron menos efectivas mientras que las rocas fosfóricas de Huila y Boyacá produjeron solo una ligera respuesta positiva. Otro ensayo con frijol (Porrillo sintético), realizado en un suelo volcánico de Popayan (6), señala la respuesta económica a algunas fuentes de fósforo apesar de que no producen los más altos rendimientos. Este es el caso de la roca fosfórica del Huila a altos niveles de aplicación y de la misma roca acidulada parcialmente. El fosfato de magnesio resultó ser una fuente tan buena como el superfosfato y la roca con azufre produjo rendimientos casi iguales a los de la roca sola.

También han sido pocos los intentos en Colombia de ensayar productos provenientes de tratamientos de rocas fosfóricas con materiales que puedan descomponerlas y

hacer que el P sea más aprovechable por las plantas. Aparte del ensayo realizado en Popayan con frijol, citado antes, solo se encuentran los trabajos hechos por Hanke (14), con mezclas de roca fosfórica de Turmequé y estiércoles fermentados anaerobicamente y sin fermentar. Estas investigaciones mostraron que la roca fosfórica se solubilizó en mezcla con estiércol y produjo buenas cosechas de cebada en calidad y cantidad, siendo rentable la aplicación directa de roca con 5 ton/ha de estiércol sin fermentar, pero quedaron por estudiar los efectos residuales de estas mezclas.

Ensayos recientes, sin publicar, realizados por el Programa de Suelos del ICA con cinco especies de gramíneas forrajeras y cinco cultivos de período vegetativo corto, en Andosoles, Inceptisoles y Oxisoles de Colombia^{1/}, indican buenas probabilidades de esperar una respuesta aceptable a las aplicaciones de roca fosfórica de Turmequé cuando se adiciona en este tipo de suelos con cultivos semestrales ó anuales tales como cebolla de rama, avena, maíz, maní y arroz de riego. (ver figuras 4, 5, 6 y 7).

En el caso de los pastos (Brachiaria decumbens, Hyparrhenia rufa, Pennisetum clandestinum, Dactylis glomerata y Anthoxanthum odoratum), los tratamientos con roca fosfórica de Turmequé no incrementan la producción total y en muchos casos ésta fué inferior a la obtenida en las parcelas testigo. Es posible que la falta de respuesta se deba a la calidad de la roca, a las propiedades de los suelos y a las condiciones climáticas (zonas altas de clima medio y frío), Por otra parte los ensayos se realizaron por muy corto tiempo (uno a dos años). En

1/ León L. A. Investigaciones realizadas en Colombia sobre el uso de diversas fuentes de fósforo como fertilizantes. (por publicar).

esta forma no fué posible observar los resultados a largo plazo para ver si las rocas utilizadas se solubilizan con el tiempo produciendo los efectos deseados en rendimiento.

En el Perú, se están llevando a cabo ensayos en la sierra y en la selva, con el fin de observar el comportamiento de la roca fosfórica de Bayovar. Se han concluido estudios preliminares con un total de 47 experimentos en cultivos anuales (papa, maíz y trigo), en las zonas de Sierra Norte y de Sierra y Ceja de Selva del centro del país^{1/}. Los resultados indican que para obtener respuestas económicamente aceptables, la roca debe concentrarse a no menos del 29% de P_2O_5 y que su finura debe ser tal que el producto pase por lo menos en un 80% la malla 200. La roca debe ser usada en suelos con pH menor de 7.0 y con un bajo contenido de fósforo disponible (Olsen < 7 ppm P). Las figuras 8 y 9 nos muestran los resultados obtenidos con papa en la localidad de Santa Rosa de Ccopa. Con una dosis de 200 kg P_2O_5 /ha aplicada como Fos-Bayóvar (roca fosfórica), por cada sol invertido en el fertilizante se obtiene un retorno marginal de S/.25 a S/.50 en el cultivo de papa.

En la Estación Experimental de Yurimaguas (Selva del Perú) la Universidad del Estado de Carolina del Norte adelanta algunos ensayos con rocas fosfóricas (21,22). En un experimento de cal-fósforo, con Panicum maximum, se incluyeron cuatro rocas fosfóricas con el fin de comparar su comportamiento con relación al superfosfato ordinario. El comportamiento de las rocas fué prometedor, tal como se muestra en la tabla 3. La roca Fosbayovar se comportó tan bien como aquellas estandar de alta reactividad, apesar de que el tamaño de sus partículas es algo grueso. La

^{1/} Davalouis J. y como M. 1976. Avances de las investigaciones realizadas a través del convenio Fosbayovar durante las campañas 1974-1975 y 1975-1976. (sin publicar)

producción de materia seca con Fasbayovar fué un 91% del promedio de las rocas estandar de la TVA y del superfosfato simple.

Como ha podido verse por los resultados presentados, se han conducido un buen número de experimentos para determinar el valor de las rocas fosfóricas aplicados directamente como fertilizantes, pero los resultados han sido muy variables y por tanto la magnitud de la respuesta es difícil de predecir.

En años recientes, se ha reconocido que no todas las rocas son idénticas y que uno de los factores principales que determina la respuesta de los cultivos es la mineralogía de la roca y su reactividad asociada. También se ha reconocido que el valor de las rocas como fertilizantes no se pueden evaluar con los resultados de un ensayo a corto plazo pues su efecto residual parece ser mayor que el de un fosfato más soluble. Desafortunadamente solo unos pocos de los ensayos realizados en el pasado presentan este tipo de información.

Predicción de la reactividad para evaluar rocas fosfóricas

En el pasado se asumía generalmente que casi todas las rocas fosfóricas contenían el mismo mineral, fluorapatita, de modo que las diferencias en P_2O_5 soluble en citratos y sus respuestas agrónómicas se atribuían a diferencias en sus propiedades físicas, generalmente tamaño de partículas y área superficial (16).

Recientemente, por estudios de caracterización, se ha demostrado que la composición de sus minerales fosfático apatíticos varía considerablemente. Con pocas excepciones las apatitas no son fluorapatita sino que pertenecen a la serie de los carbonato apatitas, en las cuales el PO_4 es reemplazado en la estructura por el CO_3 y el F y el Ca por el Na y el Mg. La reactividad química de la apatita aumenta con el

aumento del grado de substitución (16).

Según esto, la solubilidad en citratos de una roca se ha redefinido en una base absoluta para eliminar consideraciones fortuitas del grado de P_2O_5 al hacer comparaciones entre rocas fosfóricas. Así, se define al "Índice de Solubilidad Absoluta en Citratos" (ACS) como la relación entre su P_2O_5 soluble en citratos y el contenido teórico de P_2O_5 deducido de la composición particular de la apatita.

$$ACS = \frac{\% P_2O_5 \text{ soluble en citrato}}{\% P_2O_5 \text{ teórico}}$$

Esta ACS se puede predecir directamente de la relación

$$ACS = 421.4 (9.369 - A_0)$$

donde A_0 es el largo del eje a de la celda cristalina unitaria del mineral determinada por difracción con rayos X.

Evaluación de rocas fosfóricas

Con el fin de evaluar la efectividad agronómica de dos rocas colombianas y una del Perú, contra rocas estandar de los Estados Unidos y Norte del Africa, el CIAT y el IFDC (International Fertilizer Development Center) iniciaron hace más de un año un proyecto conjunto, que también contempla la evaluación de las reacciones del suelo asociadas con la aplicación directa de las rocas y la correlación entre los resultados de estos dos objetivos y las características de las rocas fosfóricas de diferente mineralogía.

La tabla 4 nos muestra los datos cristalográficos de las rocas en estudio y su índice ACS; la tabla 5 las fórmulas calculadas para algunos de las apatitas.

Dichas formulas se calcularon con ayuda de los datos de rayos X, los análisis químicos y los análisis por espectroscopia infrarroja obtenidos en el IFDC. Tal como se puede ver en la tabla 5, las apatitas en estudio no son todas iguales.

La composición química de las rocas se encuentra en la tabla 6 y un estimativo de los carbonatos libres en la tabla 7.

La reactividad química de las rocas medida por los tres métodos corrientes se incluyen en la tabla 8.

La información presentada se utilizara luego cuando se discutan los resultados de los ensayos de invernadero y campo realizados con estas rocas.

Ensayos de campo

El proyecto de fósforo cooperativo CIAT-IFDC^{1/} tiene establecidos tres ensayos de campo con el fin de lograr los objetivos indicados arriba: Uno con Frijol (Phaseolus vulgaris L.) variedad Huasanó, en un Umbrandept típico de "Las Guacas", Popayan y dos en un Haplustox típico de Carimagua, Llanos Orientales, con yuca (Manihot sculenta, Crantz), variedad Llanera y con la gramínea Brachiaria decumbens.

Se utilizaron las rocas de Carolina del Norte, Florida Central y Tennessee de los Estados Unidos, Fosbayovar de Sechura, Perú, Gafsa de Tunez y Huila y Pesca de Colombia. Las rocas fueron aplicadas al voleo e incorporadas al suelo en dosis que van desde 0 hasta 400 kg de P_2O_5 /ha, en un diseño de parcelas divididas donde las dosis son las parcelas principales y las fuentes las subparcelas.

^{1/} Trabajos realizados por Larry Hammond para optar su grado de Ph.D. en la Universidad del Estado de Michigan, Estados Unidos. (sin publicar)

Se incluyeron dos tratamientos más con Superfosfato triple aplicado una sola vez al iniciar los ensayos y antes de cada siembra nueva de frijol o yuca, con el fin de estudiar el efecto residual de las rocas. Para el Brachiaria se adiciona superfosfato triple anualmente después de un corte que coincida aproximadamente con la fecha apropiada.

En estos experimentos de campo, los resultados de la primera cosecha de frijol y yuca y dos cortes de Brachiaria mostraron una respuesta significativa al fósforo hasta el nivel de las 400 kg P_2O_5 /ha (Figuras 10, 11 y 12). En cuanto a las fuentes de fósforo se presentó una correlación estrecha con los resultados de caracterización de las rocas en el laboratorio (Figura 10) en los ensayos de frijol y yuca.

En el caso del experimento de frijol la primera cosecha se hizo a los 4 meses de aplicadas las rocas. Apesar de ser tan corto el tiempo transcurrido, las rocas altamente solubles (Gafsa, Sechura) casi alcanzaron en rendimiento al superfosfato triple. Los rendimientos correlacionaron muy bien con la solubilidad en citratos (figura 13).

Los resultados de la segunda cosecha de frijol se presentan en la figura 14. Comparando estos resultados con los de la primera siembra (figuras 10 y 14) podemos notar que hubo un gran incremento en la producción por la segunda adición del superfosfato triple en las dosis por encima de 100 kg P_2O_5 /ha. Los tratamientos con 200 y 400 kg P_2O_5 /ha de las rocas de Sechura y Pesca mostraron un incremento apreciable en la producción con respecto a los del semestre anterior. Lo mismo sucedió con la dosis más alta de la roca de Tennessee. Aparentemente

estas rocas a niveles altos de fósforo están mostrando un buen efecto residual. El orden de efectividad de las rocas continuó siendo el mismo que para la primera siembra.

Con la yuca, apesar de que se presentaron respuestas hasta 100 kg de P_2O_5 /ha, hubo muy poca diferencia entre las fuentes usadas (figura 11). Los rendimientos con superfosfato fueron altamente significativos solamente comparados con los de la roca de Tennessee. Todas las fuentes dieron rendimientos significativamente mejores que los de las parcelas testigo. De todas maneras se encontró el mismo orden relativo de efectividad de las rocas.

El experimento con el Brachiaria decumbens (figura 12), contabilizando los dos cortes realizados, muestra en general una buena respuesta hasta los 100 kg P_2O_5 /ha para casi todas las rocas utilizadas. Las rocas de Gafsa, Sechura y Florida no presentan incrementos apreciables en producción entre las dosis de 100 y 400 kg P_2O_5 /ha. En cambio, en el caso de las rocas de Huila, Pesca, Tennessee y el superfosfato triple el aumento de producción de forraje seco entre estas dos dosis resultó ser en general mayor de una tonelada por hectárea. En este experimento posiblemente aún es muy corto el tiempo para observar efectos residuales y para sacar conclusiones valederas. Aquí, el orden de efectividad de las rocas no coincide con el obtenido por medio de los parámetros analizados en el laboratorio. Sería conveniente esperar algunos cortes más para observar si el orden actual persiste o si va cambiando con el tiempo.

Los resultados aquí presentados indican que el uso de rocas fosfóricas, sobretudo aquellas de alta reactividad, puede ser recomendable cuando el precio de formas mas solubles de fósforo, como superfosfato simple o triple es comparable, en

base a unidad de P_2O_5 , con el de las rocas fosfóricas naturales.

Alternativas para mejorar la eficiencia de las rocas fosfóricas

Existen varias alternativas para mejorar la eficiencia de las rocas fósforicas, algunas de las cuales se han ensayado o se están probando mediante experimentos que realiza el proyecto de fósforo CIAT-IFDC.

Tamaño de partículas

Una de estas alternativas sería el reducir el tamaño de las partículas de la roca que se aplica directamente al suelo. Apesar de que se encuentra nutrida información sobre el efecto benéfico del uso de material finamente molido, las conclusiones no son definitivas^{1/}. En muchos casos, dependiendo de la calidad de la roca y de las características del suelo resulta casi igual y aveces mejor el uso de material de tamaño relativamente grueso (8). Para mejorar las técnicas de aplicación de las rocas se han ensayado productos granulados de éstas finamente molidas sin mucho éxito (10). En la actualidad se está experimentando con otro tipo de granulación (con otros materiales que aumenten su efectividad) que posiblemente tenga un futuro más promisorio.

Acidulación parcial de la roca

Son muchos los investigadores que han estudiado el efecto de la acidulación parcial de las rocas fosfóricas en la aprovechabilidad del fósforo. Generalmente se usan los ácidos fosfórico, sulfúrico ó clorhídrico.

1/ Doll E. C. Utilization of Phosphate Rock for Direct Application to Soils. International Fertilizer Development Center. (mimeografiado)

También, el superfosfato que en el suelo y en forma localizada produce inicialmente una solución muy ácida al disolverse se ha utilizado para simular una acidulación parcial.

Un ensayo realizado por Howeler en Popayan con frijol Porrillo Sintetico (6), mostró que la roca del Huila parcialmente (20%) acidulada con ácido sulfúrico podía producir respuestas económicas apesar de que no daba los rendimientos más altos (figura 15).

Por los informes que se encuentran en la literatura^{1/}, parece que bajo determinadas condiciones, la acidulación parcial de una roca fosfórica puede aumentar su efectividad como fuente de fósforo. Siembargo, para hacer una evaluación económica de esta práctica en el trópico, es necesario contar con una mayor información puesto que la que existe en la actualidad es muy escasa.

Mezclas de rocas fosfóricas con sustancias formadoras de ácidos

En cuanto a este tema también han sido muchos los informes publicados, sobre todo en relación con mezclas de rocas fosfóricas con azufre^{1/}. En este caso los resultados son contradictorios. Algunas veces las mezclas resultan agronómicamente mejores que la roca sola y otras sucede lo contrario (26, 22). En Australia se ha experimentado en pastos con regular éxito con productos granulados de roca fosfórica, azufre y Thiobacilos, bacterias del suelo que se alimentan de azufre elemental dejando como producto de deshecho ácido sulfúrico (2).

^{1/} Doll E. C. Utilization of phosphate rock for direct application to soils. International Fertilizer Development Center. (mimeografiado)

Se han ensayado también, con resultados positivos las mezclas fermentadas o directas de rocas fosfóricas con materiales orgánicos, generalmente estiercol de aves, vacunos u ovinos, ó residuos de cosechas (14).

El uso del fosfato monocálcico (ó superfosfato triple), en mezcla con rocas fosfóricas o aplicado en banda sobre una incorporación al suelo de una roca fosfórica aplicada al voleo, ha producido resultados altamente positivos y dignos de tenerse en cuenta. Un ejemplo muy sugestivo se presenta en la figura 15 sobre resultados de un ensayo reciente con papa realizado en el Perú^{1/}.

Alteración de las rocas por mezclas y tratamiento térmico con silicatos ó carbonatos de magnesio ó de sodio

La alteración térmica y la fusión de las rocas fosfóricas con sílice, carbonatos de magnesio ó sodio o con minerales de magnesio tales como la serpentinita o la olivina, produce compuestos (silicofosfatos) denominados termofosfatos. Entre estos se encuentran los fosfatos de Rhenania y el Fosfato de Magnesio Fundido (FMP). Los ensayos realizados con este tipo de productos indican un aumento apreciable en el fósforo aprovechable de las rocas y respuestas casi iguales o algunas veces superiores a las producidas por la aplicación del superfosfato simple o triple (25, 22).

Esta clase de productos, sobretodo los FMP parecen muy promisorios para los suelos ácidos del trópico, donde generalmente se presentan deficiencias de magnesio y los suelos son altamente fijadores de fósforo. Aparentemente el silicio tiene un efecto de "bloqueo" de los sitios de fijación del fósforo (25).

1/ Davelouis J. y Cano M. Avances de las Investigaciones realizadas a través del convenio Fos-Bayovar durante las campañas 1974-1975 y 1975-1976. (sin publicar)

Uso de cal y silicatos para mejorar la aprovechabilidad del fósforo

Sobre este tema se han realizado numerosísimas investigaciones que generalmente han dado respuestas positivas sobretodo cuando se utilizan fuentes de fósforo muy solubles (3, 25). Efectos de la cal y los silicatos en el caso de las rocas fosfóricas no ha sido tan extensamente estudiado en los trópicos, pero algunos ejemplos nos indican que los resultados obtenidos son muy variables y dependen, entre otras cosas, de las propiedades del suelo, de la roca y del cultivo en estudio.

Un ensayo realizado en un Ultisol de la Selva Peruana (Yurimaguas), con Panicum maximum, mostró por la suma de los rendimientos de los tres primeros cortes que las aplicaciones de 1 y 2 ton/ha de cal aumentaron la respuesta a las aplicaciones de la roca Fosbayovar (Sechura), siendo los rendimientos más altos con 100 kg P/ha y 2 ton de cal/ (27).

En cambio, un ensayo con frijol realizado por Howeler y otros en un Andosol de Popayan (7), mostró una buena respuesta a las aplicaciones de 2 y 6 ton de cal/ha, pero practicamente ninguna ni a las dosis ni a las fuentes de fósforo. Apesar de esto, con 1/2 y 2 ton de cal/ha la roca de Gafsa (Reno) produjo rendimientos más altos que el superfosfato y que la roca Huila. Cuando se usaron 6 ton de cal/ha la roca Huila produjo en promedio los más altos rendimientos (figura 17).

Mejoramiento de la eficiencia mediante diferentes métodos de aplicación de fuentes de fósforo

Suelos altamente fijadores de fósforo son generalmente manejados en tal forma que los fertilizantes fosfatados solubles en agua son aplicados en banda para disminuir el volumen del suelo que podría reaccionar con este elemento. Como en la mayoría

de los casos, en América Latina el costo de la fertilización con fósforo es muy alto, Salinas y Sanchez^{1/} han propuesto varias alternativas entre las que se encuentra la selección de métodos más efectivos de colocación de fertilizantes.

Han sido muchas las alternativas propuestas y estudiadas, las cuales han dado muy buenos resultados dependiendo del suelo y del cultivo en cuestión (25).

Varios de estos métodos de aplicación se están ensayando actualmente en algunos países tropicales de América Latina. Entre ellos tenemos:

- 1.- Aplicar rocas fosfóricas al voleo y superfosfato triple en banda o en cinta a diferentes niveles y relaciones.
- 2.- Aplicar las fuentes de fósforo en forma tal que el contenido de fósforo en el suelo se eleve solo en un 10 a 15% del volumen total la superficie arada, aplicando los fertilizantes (sencillos o en mezclas) en una cinta (banda ancha) en la superficie y luego incorporándola ó aplicando al voleo grandes gránulos de superfosfato triple de forma que alrededor de cada gránulo se produzca una zona muy alta en fósforo.
- 3.- Aplicar al voleo e incorporar rocas fosfóricas en gránulos de varios tamaños.
- 4.- Aplicar el fertilizante al voleo sin incorporarlo (arroz inundado y pastos).

Selección de especies y variedades tolerantes a baja aprovechabilidad del fósforo

Tal como se encuentran diferencias entre especies y variedades en tolerancia a altas concentraciones de aluminio en la solución del suelo y a bajas concentraciones

^{1/} Salinas, J. G. and P. Sánchez. 1976. Soil-plant relationship affecting varieties and species differences in tolerance to low available soil phosphorus. Ciencia y Cultura-Brasil. En prensa.

de calcio (12), también se encuentran plantas que requieren muy poco fósforo para llegar a rendimientos máximos, ó que lo pueden tomar de fuentes poco solubles como algunas rocas fosfóricas (25).

Las diferencias se pueden medir entre cultivos o variedades mediante los llamados requerimientos externos e internos, por las tasas de absorción y translocación o por los efectos en la rhyzosfera^{1/}. Deist y otros (9) observaron que las dicotiledoneas pueden utilizar mejor el fósforo proveniente de las rocas fosfóricas que los monocotiledoneas. Un ensayo de invernadero en el CIAT (figura 18) muestra como ecotipos y variedades de stylosanthes pueden tomar fósforo de fuentes poco aprovechables como es el caso de la roca fosfórica del Huila. Se observan aquí también diferencias en rendimiento entre ecotipos y variedades (7). En la actualidad los programas de Frijol, Yuca y Ganado de Carne del CIAT adelantan investigaciones para seleccionar variedades que se adapten a condiciones de suelos ácidos bajos en fósforo (6, 7).

Respuesta a la inoculación con mycorrhiza Endogone

La presencia de una infección en algunas raíces de plantas con endomycorrhizae aumentan su habilidad para tomar fósforo, especialmente en suelos deficientes en este elemento.

Parece que este tipo de microorganismos de la rhizósfera puedan disolver formas minerales poco solubles y mineralizar el fósforo orgánico. Hay evidencia para algunos cultivos de respuesta a la inoculación con mycorrhiza Endogone^{1/}.

1/ Sanchez P. A. and G. Uehara. Management considerations for acid soils with high Phosphorus Fixation capacity. NCAES Station and U. of Hawaii AE Station. (sin publicar)

Es posible que la inoculación con este microorganismo sea un medio adicional de disminuir los requerimientos de fósforo para ciertos cultivos.

LITERATURA CITADA

- 1.- Acosta, P. A. 1974. Producción de fertilizantes fosfatados en Colombia. Suelos Ecuatoriales 4:409-422.
- 2.- Anónimo. 1975. Biosuper: Potential P_2O_5 -S Fertilizer for the Tropics. Sulphur Institute Jour. 11:9-11.
- 3.- Bornemisza, E. y A. Alvarado. (Ed). 1974. Manejo de Suelos en la América Tropical. University Consortium on Soils of the Tropics. Soil Science Department. North Carolina State University, Raleigh, N. C. 27607, USA.
- 4.- Cathcart, J. B. 1975. Phosphate Fertilizer Materials in Colombia. Imports, uses, and domestic supplies. Jour. Research U.S. Geol. Survey 3:659-663.
- 5.- Centro Internacional de Agricultura Tropical, CIAT. 1974. Informe Anual. Cali, Colombia.
- 6.- Centro Internacional de Agricultura Tropical, CIAT. 1975. Informe Anual. Cali, Colombia.
- 7.- Centro Internacional de Agricultura Tropical, CIAT. 1976. Informe Anual. Cali, Colombia.
- 8.- Cooke, G. W. 1956. The value of Rock Phosphate for Direct Application. Empire Jour. of Exper. Agr. 24:295-306.

- 9.- Deist, J., P. G. Marais, R. B. A. Harry and C. F. G. Heyns. 1971. Relative availability of rock phosphate to different plant species. *Agrochemophysica* 3:35-40.
- 10.- Engelstad, O. P., J. G. Gelsinger and P. J. Stanger. 1972. Tailoring of Fertilizers for rice. Bulletin Y-52. Tennessee Valley Authority, Muscle Shoals, Alabama.
- 11.- Ensminger, L. E., R. W. Pearson and W. H. Armingier. 1967. Effectiveness of rock phosphate as a source of phosphorus for plants. United States Department of Agriculture. Agricultural Research Service. Bulletin 41-125, January-1967.
- 12.- Foy, C. E. 1974. Effects of aluminum on plant growth. pp. 601-642. In: E. W. Carson (Ed): *The plant root and its environment*. Univ. Press of Virginia, Charlottesville.
- 13.- Guerrero, R. 1974. La fertilización fosfórica en cultivos de clima frío. *Suelos Ecuatoriales* 4:179-223.
- 14.- Hanke, F. 1974. La utilización de la fosforita colombiana por medio de procesos microbiológicos. *Rev. Suelos Ecuatoriales. El Fósforo en zonas tropicales* 6(1):301-325.
- 15.- Howeler, R. H. 1974. La fertilización fosfórica del arroz de riego y de secano. *Rev. Suelos Ecuatoriales. El Fósforo en zonas tropicales* 6(1):245-263.
- 16.- Lehr, J. R. and G. H. McClellan. 1972. A revised laboratory scale for evaluating phosphate rocks for direct application. TVA Bull Y-43.

- 17.- McCormick, N. y F. Galiano. 1961. Estudio sobre el valor fertilizante del fosfato Thomas (Escorias Thomas). Revista IIT (Bogotá) 3(9):25-26.
- 18.- Michielin, A. P., L. A. León y A. Ramírez. 1974. Uso eficiente de fertilizantes fosfatados en la producción de pastos en suelos ácidos. Revista Suelos Ecuatoriales. El Fósforo en zonas tropicales 6(1):265-287.
- 19.- Miyasaka, S., A. A. Rocha, A. H. Leal, M. Chaves y P. C. Viana. 1976. Fertilizantes. Pesquisa e desenvolvimento de Fertilizantes para o Brasil. Boletín Informativo da Sociedade Brasileira de ciência do Solo. 1:46-51.
- 20.- Mortvedt, J. J. 1974. Desarrollos recientes de la tecnología de fertilizantes fosfatados. Suelos Ecuatoriales. 4:389-407.
- 21.- North Carolina State University. Soil Science Department Agronomic-Economic Research on Tropical Soils. Annual Report for 1974.
- 22.- North Carolina State University. Soil Science Department. Agronomic-Economic Research on Tropical Soils. Annual Report for 1975.
- 23.- Ortiz, M. A. y P. Rubio. 1973. Evaluación de fuentes de fósforo a diferentes niveles en la fertilización edáfica de la papa (Solanum tuberosum L.) Tesis Fac. Agron. Manizales. Universidad de Caldas (Mimeografiada). 22 p.
- 24.- Rodríguez, M. y J. Lotero. 1967. Respuesta de la lechuga romana y la alfalfa a fuentes y dosis de P y Ca1 en un suelo orgánico de Antioquia. Revista ICA p:135-152.

- 25.- Sanchez, P. A. 1976. Properties and Management of Soils in the Tropics.
John Wiley and Sons, New York, USA.
- 26.- Terman, G. L., E. C. Moreno and G. Osborn. 1964. Acidulation of
Phosphate Rock in Soil. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 28:104-107.
- 27.- Wachtel, H. The Assessment of the fertilizing effect of soft-mineral
phosphate according to its solubility in formic and Citric Acid.
Part II-Correlation between solubility and P effect obtained in pot
and field trials (mimeografiado) p 25.

Tabla 1.- Reservas brasileiras de rocas fosfóricas (1)

Município e Estado	Local	Tipo de Minério	Reserva (2)	
			Total 10 ³ t	Teor P ₂ O ₅ %
Anitápolis, SC	Rio Pinhelros	Carbonatito-Apatita	-	-
Jacupiranga, SP	Morro de Mina	Carbonatito-Apatita	100.000	<5
Jacupiranga, SP	Morro de Mina	Carbonatito-Apatita	-	-
Registro, SP	Mina de Serrote	Carbonatito-Apatita	10.000	25
Registro, SP	Guavirova Serrana	Carbonatito-Apatita	8.000	24-36
Iperó, SP	Ipanema	Glimerito-Apatita	50.000	7
Ribeira, SP	Barra de Itapixapuã	-	-	-
Piedade, SP	Sarupuí	-	-	-
Ilha de Alcatraz, SP	-	Guano	-	-
Ilha de Castilhos, SP	-	Guano	20.000	12
Araxá, MG	Barreiro	Carbonatito-Apatita	92.000	20
Tapira, MG	Mata da Corda	Tufito-Apatita	-	-
Abaeté, MG	Cedro	Apatita (veio)	1.000	40
Guanabara, RJ	Ilha Cagarras	Guano	10	6
Rio de Janeiro	Ilha Ancoras	Guano	100	9
Ipirá, BA	Panelas	Apatita	500	30
Arq. Abrolhos, BA	-	Guano	50	9
Monteiro, PR	Diversos	Guano	108	33
Olinda-Paulista, PE	Diversos	Fosforita	80.000	22
Fernando de Noronha	Ilha Rata	Guano	500	13
Maranhão	Ilha Trauíra	Bauxita Fosforosa	15.500	26
Maranhão	Chapada Pirocaua	Bauxita Fosforosa	-	-
Corumbá, MT	Mandioré	Guano	2.800	15
Catalao-Ouvidor, GO	Chapadão	Carbonatito-Apatita	250.000	>5
Catalao-Ouvidor, GO	Catalão II	Carbonatito-Apatita	-	-
Patos Minas, MG (3)	Pirubinhas e Rocinha	Apatita (veio)	450.000	10

Fuentes: (1) DNPM;

(2) Medidas, indicadas o inferidas;

(3) Revista "Visão" - 27/01/75

Tabla 2.- Localización, reservas y grado de las minas de roca fosfórica en Colombia

Mina Localización	Reserva		Grado (% P ₂ O ₅)	Grosor Camas (metros)	Departamento
	Indicada	Possible ('000,000 toneladas)			
Sardinata	1	40	30	1.5	Norte Santander
Azufrada	1-5	30	18	3.5	Santander
San Vicente	1	20	23	3.0	Santander
Pesca	10	40	25	3.0	Boyaca
Tirmeque	10	20	17	3.6	Boyaca
Tesalia	1	10	18	1.4	Huila

Tabla 3.- Comparación entre diferentes fuentes de fósforo en producción anual de materia seca de Panicum maximum durante el primer año de crecimiento. Valor P = 200 kg P/ha*

Fuente	Total P ₂ O ₅	Citrato soluble	Citrato soluble del P total	Producción anual de materia seca
	%	%	%	tons/ha
Superfosfato simple	20.0	100.0	100.0	22.7
Roca Fosbayovar	30.9	7.8	25.2	20.4
Roca Carolina del Norte (PR-3)	29.9	7.8	26.1	21.7
Roca Florida del Norte (PR-4)	32.4	6.6	20.4	22.2
Roca Morocco (PR-8)	33.3	5.1	15.3	22.7

* Composición química suministrada por el Dr. E. C. Doll, Tennessee Valley Authority

Tabla 4.- Datos cristalograficos de rocas fosfóricas e indice ACS

	Dimensiones de la unidad de celda a (A)	Indice ACS
Roca Huila - Colombia	9.340	12.20
Roca Pesca - Colombia	9.346	9.68
Roca Sechura - Perú	9.337	
Hiperfosfato Reno - Túnez	9.325	18.50
Roca Tapira - Brasil	9.401	
Roca de Carolina del Norte-USA	9.322	19.80
Roca de Florida Central-USA	9.345	10.10
Roca de Tennessee-USA	9.357	5.05

Tabla 5.- Fórmulas empíricas calculadas para apatitas

Roca	Fórmula Empírica
Huila	Ca 9.69 Na 0.22 Mg 0.09 (PO ₄)5.14(CO ₃)0.86 F 2.34
Pesca	Ca 9.75 Na 0.18 Mg 0.07 (PO ₄)5.28(CO ₃)0.72 F 2.29
North Carolina	Ca 9.53 Na 0.34 Mg 0.13 (PO ₄)4.77(CO ₃)1.23 F 2.49
Tennessee	Ca 9.85 Na 0.11 Mg 0.04 (PO ₄)5.54(CO ₃)0.46 F 2.18
Solubilidad Absoluta en Citratos = ACS	
ACS = 421.4 (9.369 - a ₀)	
a ₀ = longitud del eje a de la unidad de celda de la apatita	

Tabla 6.- Composición química de rocas fosfóricas

Muestra de roca	Composición, Peso %					
	CaO	P ₂ O ₅	Na ₂ O	MgO	CO ₂	F
Huila	39.4	20.9	0.28	0.21	8.0	2.4
Pesca	28.1	19.8	0.16	0.11	1.3	2.2
Sechura (Bayovar)	45.9	30.0	2.10	0.53	4.1	2.8
Gafsa (Reno)	49.3	30.0	1.20	0.52	5.8	3.9
Tapira	51.1	35.5	0.13	0.50	0.5	1.5
Carolina del Norte	48.3	32.4	0.68	0.46	5.4	3.7
Florida Central	47.5	32.7	0.66	0.32	3.3	3.6
Tennessee	42.3	30.1	0.40	0.28	1.4	3.2

Tabla 7.- Estimado de carbonatos libres en rocas fosfóricas

Muestra de roca	Contenido de CO ₂ en roca fosfórica, %		
	*Asociado con apatita	**Asociado con apatita + carbonatos libres	Asociado con carbonatos libres
Huila	2.2	8.0	5.8
Pesca	1.7	1.3	-
Gafsa (Reno)	4.5	5.8	1.3
Carolina del Norte	5.2	5.4	0.2
Florida Central	2.9	3.3	0.3
Tennessee	0.3	1.4	1.1

* Estimado por el método de Raxos X

** Análisis químico actual

Tabla 8.- Solubilidad de rocas fosfóricas (1 g de roca/100 ml de solvente)

Rocas	% P ₂ O ₅ Soluble de la roca		
	CAN	AC 2%	AF 2%
Huila	0.5	5.2	6.2
Pesca	1.1	7.0	5.3
Sechura (Bayovar)	4.3	15.2	21.8
Reno (Gafsa)	4.4	14.1	22.4
Tapira	0.9	5.7	3.8
North Carolina	7.0	15.9	25.7
C. Florida	1.6	8.4	8.2
Tennessee	1.5	8.8	6.9

CAN = citrato de amonio neutro

AC = ácido cítrico

AF = ácido fósmico

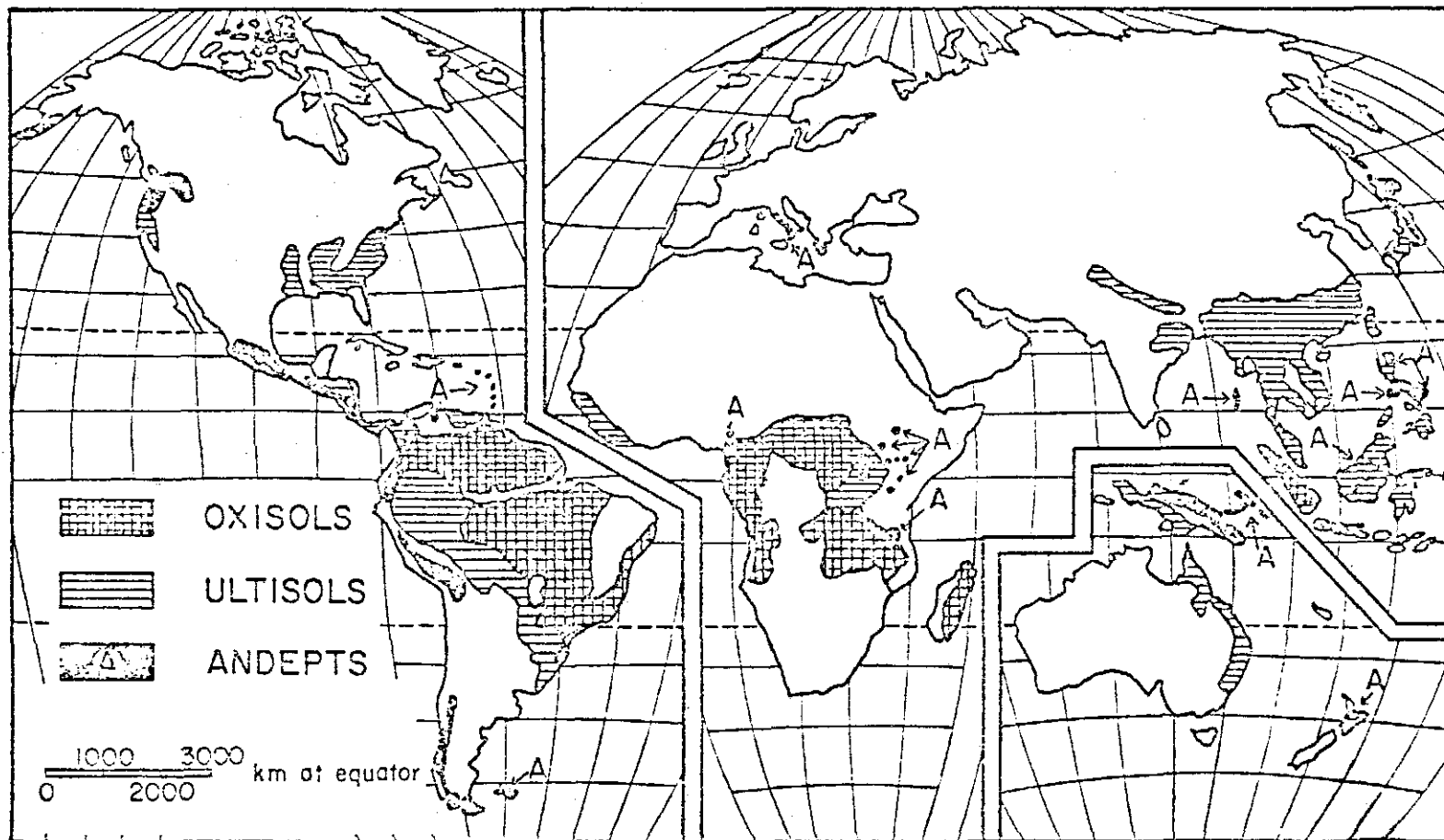


Figura 1.- Distribución de Oxisoles, Ultisoles y Andepts.



Figura 2.- Localización de las mayores reservas conocidas de fosfatos en Brasil, Colombia, Perú y Venezuela.

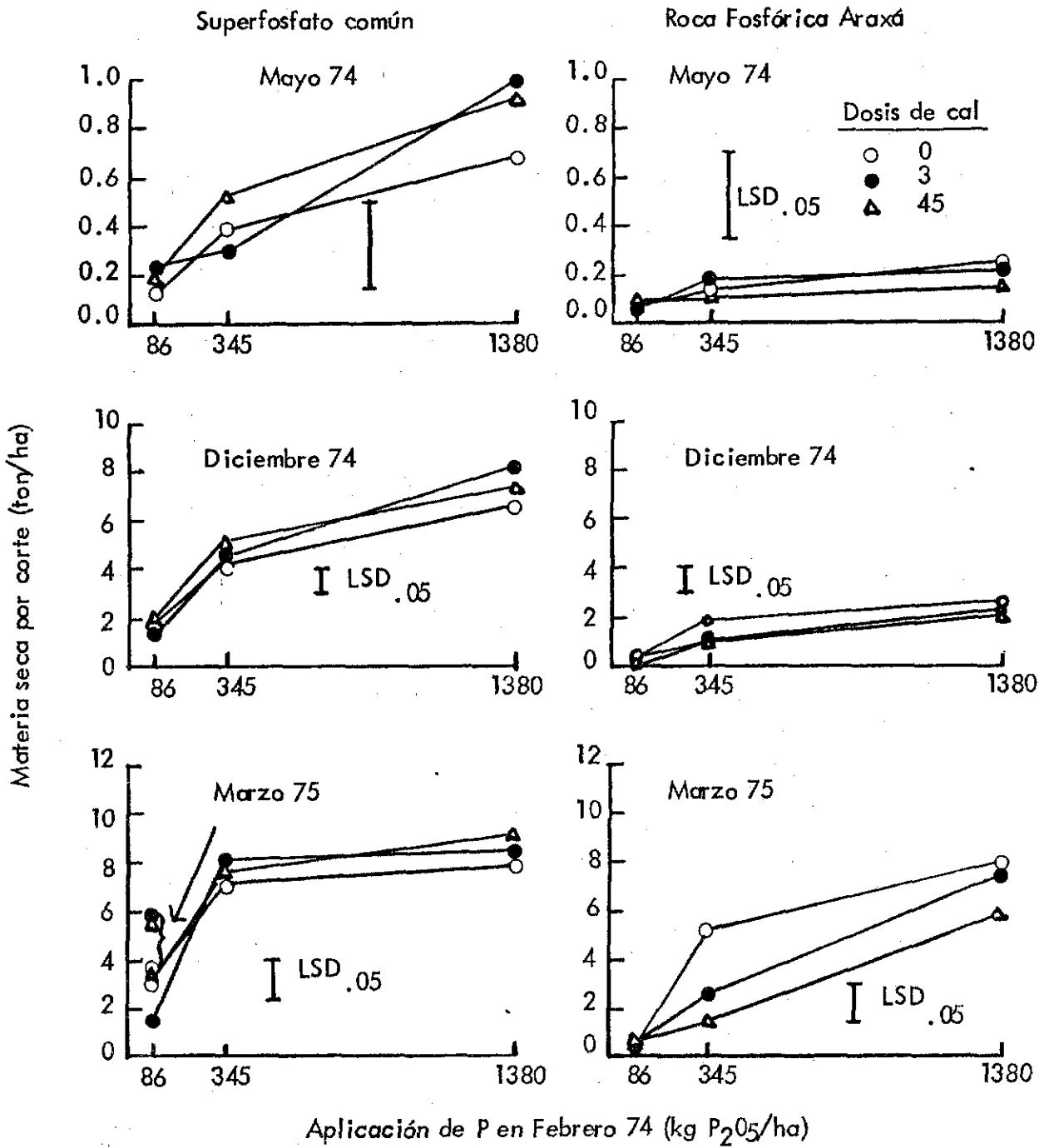


Figura 3.- Incremento de la disponibilidad de roca fosfórica Araxá con el tiempo en Brachiaria decumbens.

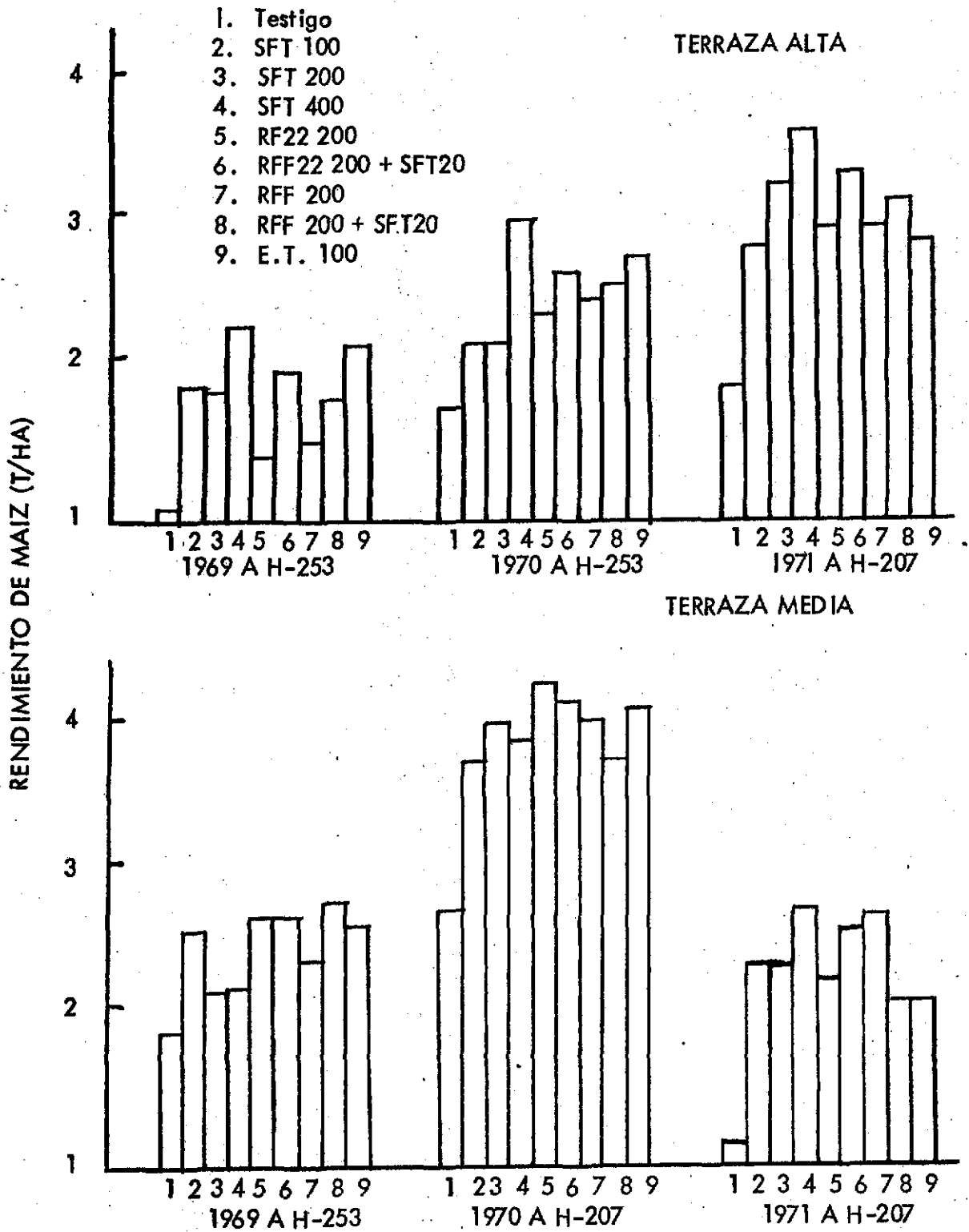


Figura 4.- Respuesta del maíz en suelos de las terrazas alta y media de "La Libertad", Llanos Orientales, a las aplicaciones al voleo de diversas fuentes y dosis de P.

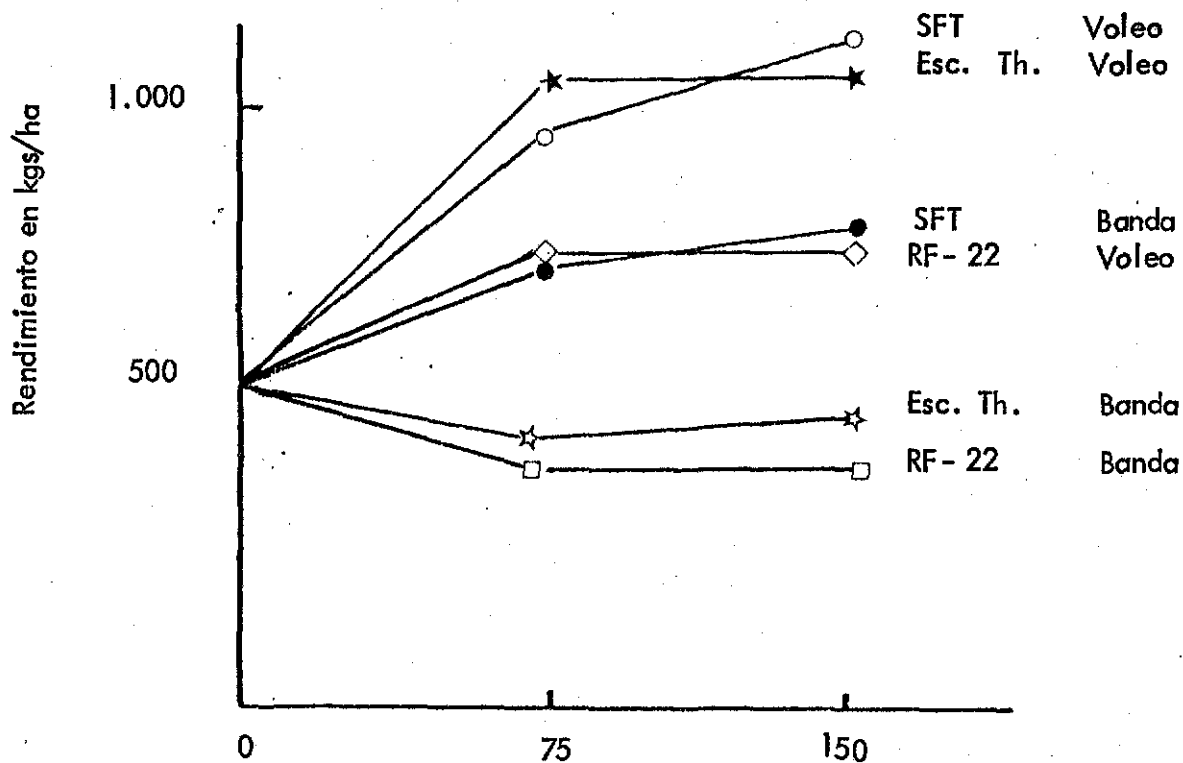


Figura 5.- Efecto comparativo de la influencia de aplicaciones de superfosfato triple, Escorias Thomas y roca fosfórica 22 (Turmaqué, Colombia) y forma de aplicación en el rendimiento de maní en un suelo de Carimagua.

1974 B

1975 B

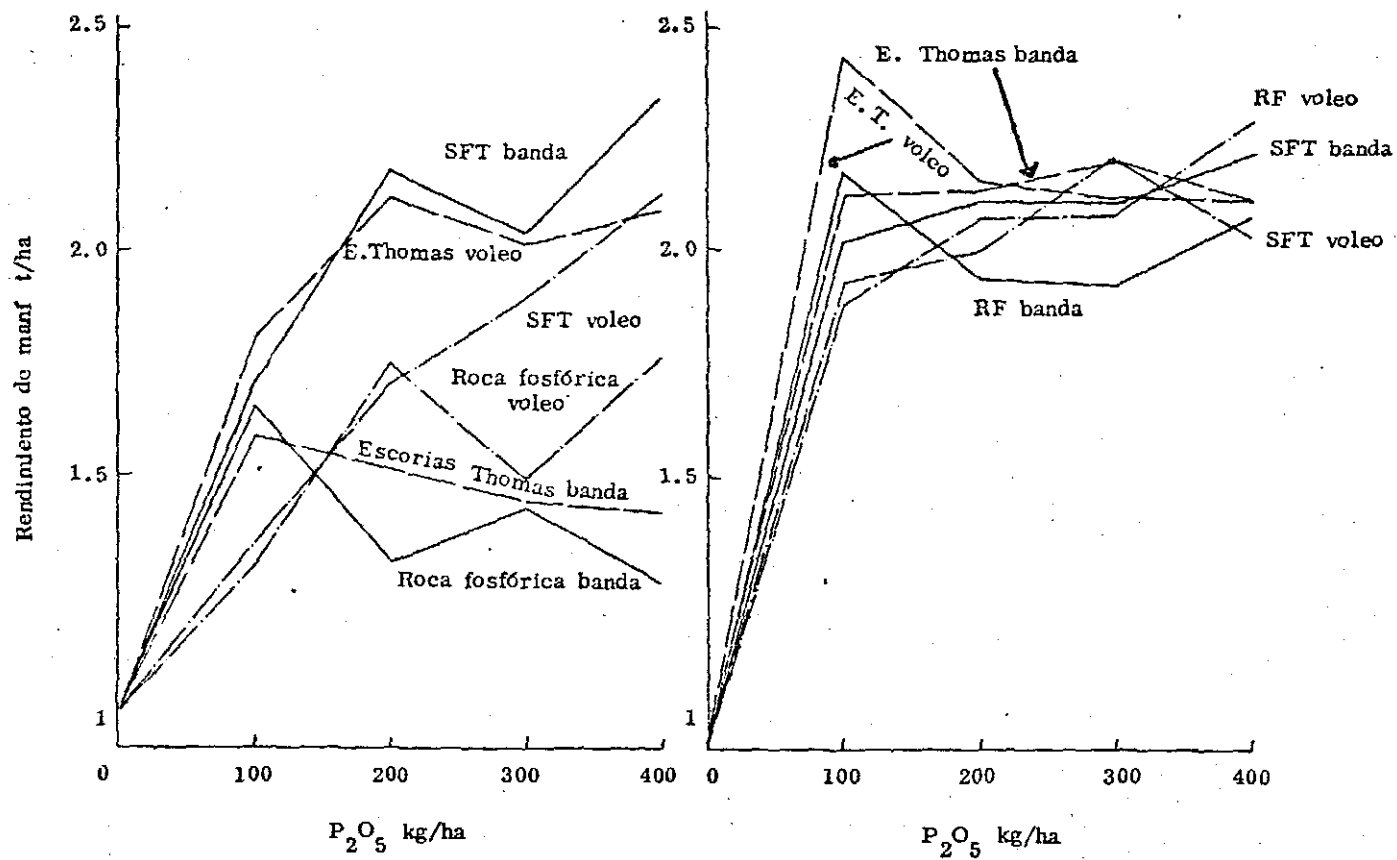


Figura 6.- Respuesta del maní, variedad Tatui-76 en un suelo de laterraza alta de "La Libertad", Llanos Orientales, a fuentes, métodos de aplicación y dosis de P. 1975 B. Efecto residual.

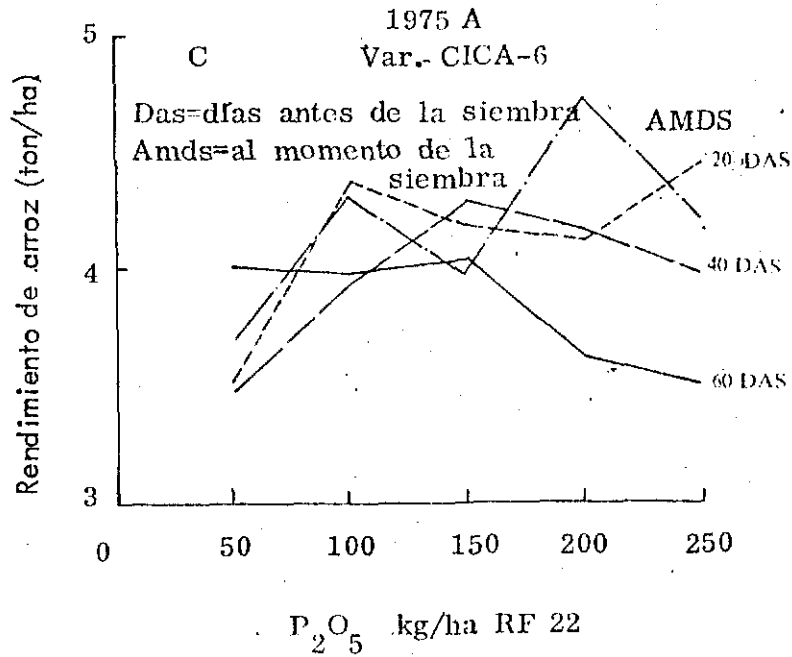
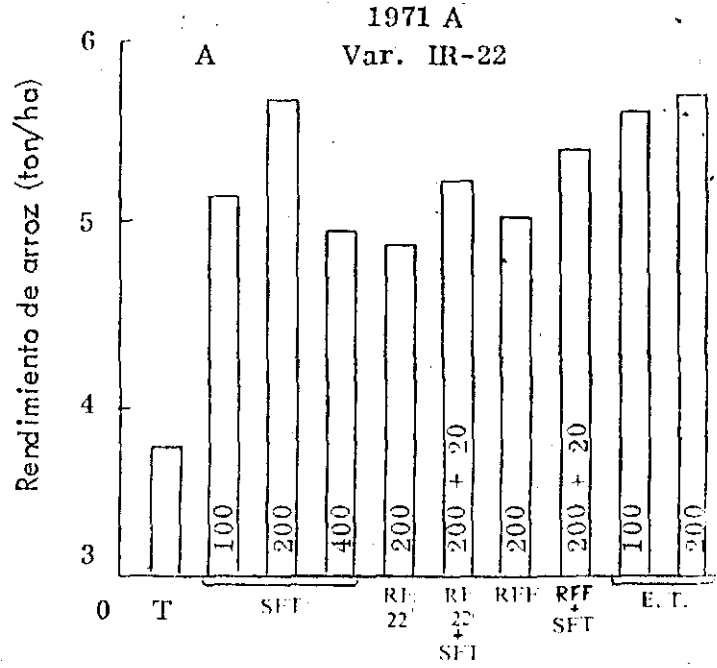
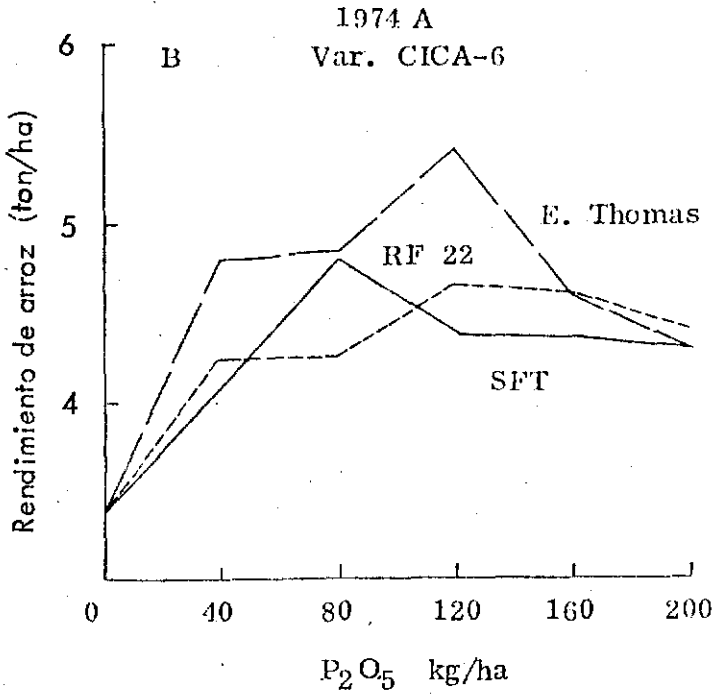


Figura 7.- Respuesta del arroz, en un suelo de la terraza media de La Libertad Llanos Orientales, a fuentes, dosis y épocas de aplicación de P.

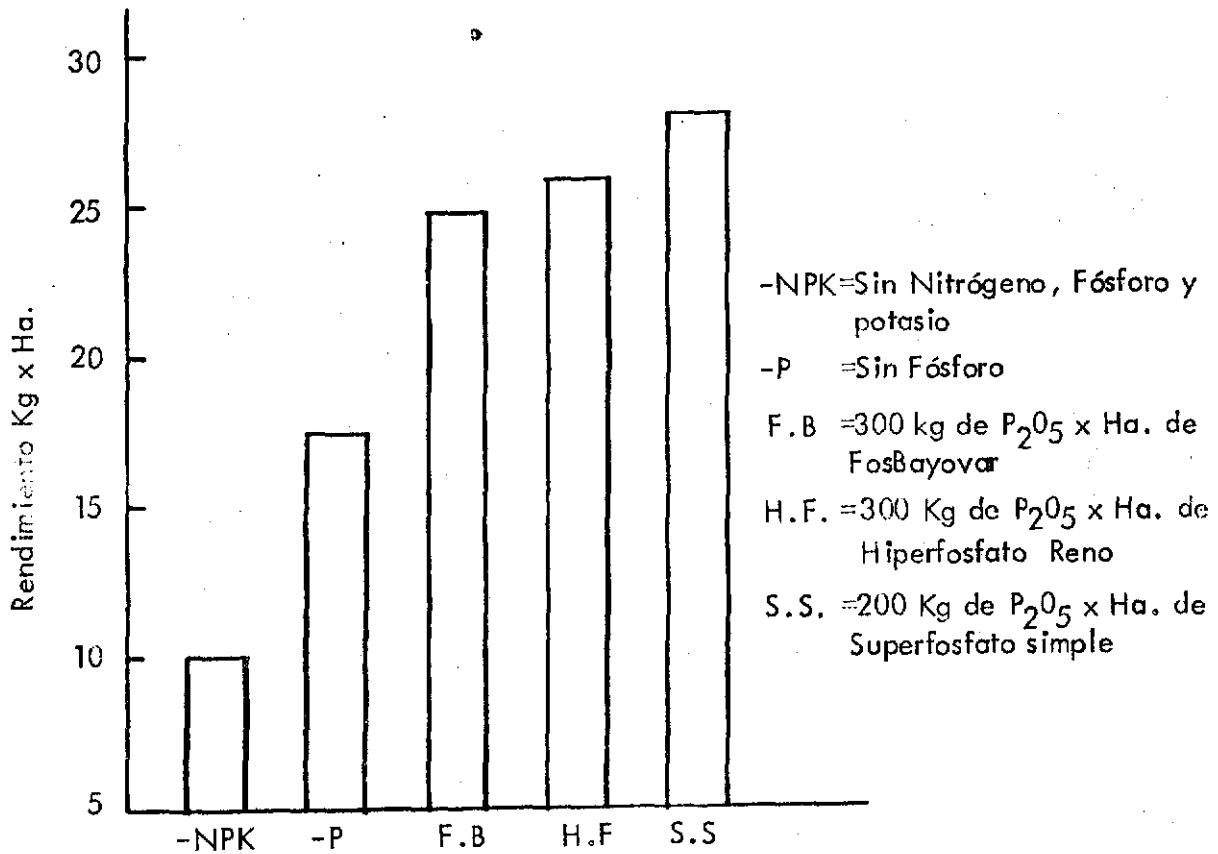


Figura 8.- Efecto comparativo de fuentes fosfatadas en el cultivo de papa cultivar "Cuzco" en la licalidad de Santa Rosa de Ocopa. Campaña 1975-1976.

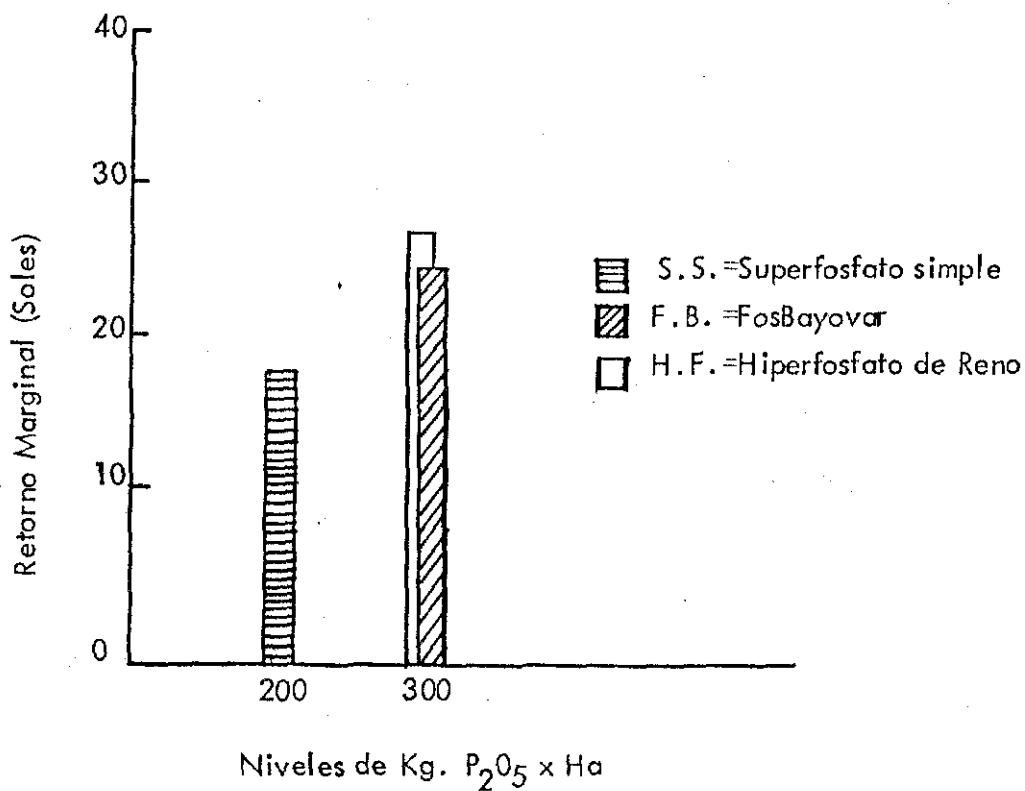


Figura 9.- Retorno Marginal del Fos-Bayovar y del Hiperfosfato Reno as/.2,000 T.M. y del Superfosfato simple as/.3,692 T.M. en un Ensayo Semi Industrial. Localidad Santa Roca de Ocopa. Campaña 1975-1976.

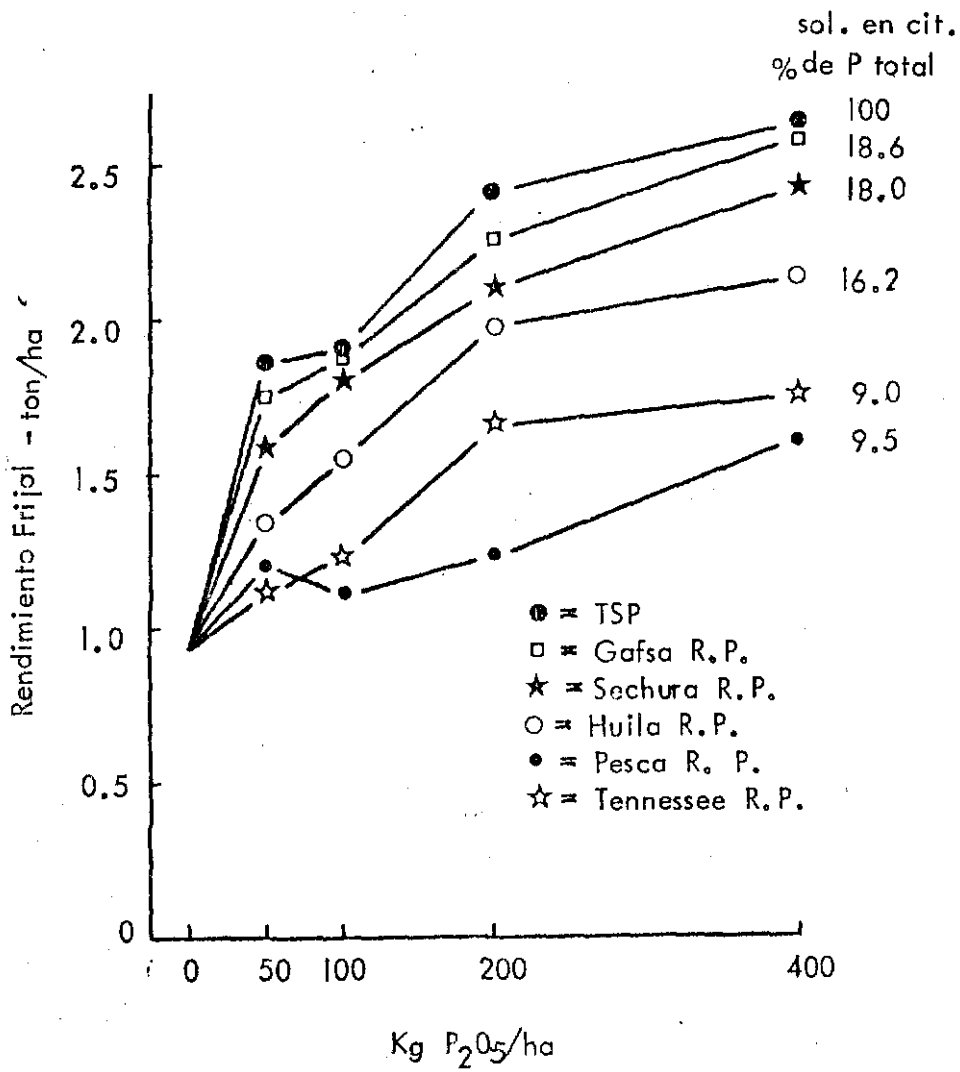


Figura 10.- Respuesta del frijol Huasanó a dosis y fuentes de P en un Andosol de Popayan.

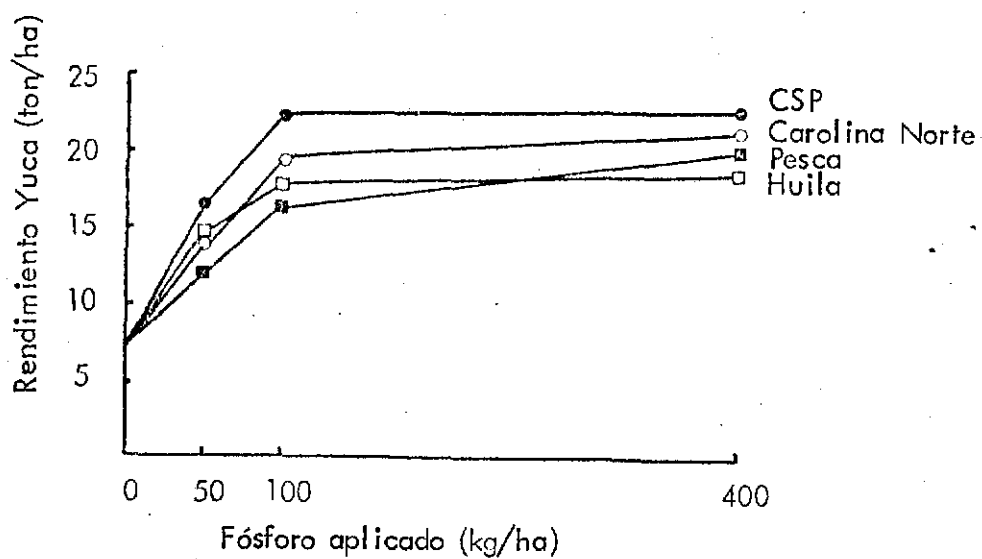


Figura 11.- Respuesta de la yuca a dosis y fuentes de fósforo en un Oxisol de Carimagua.

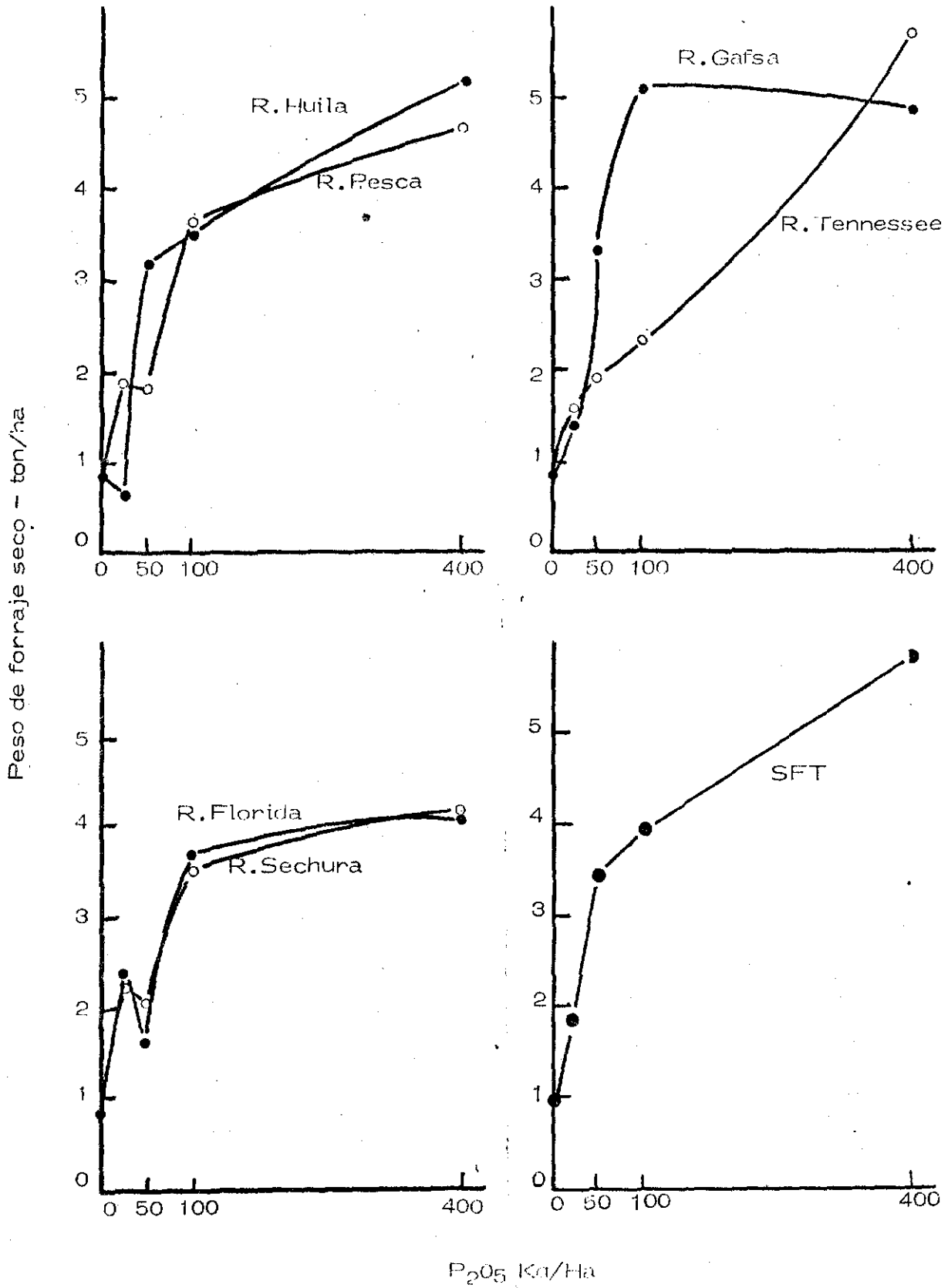


Figura 12.- Respuesta del *Brachiria decumbens* a dosis y fuentes de P en un Oxisol de Carimagua. Promedio de dos cortes.

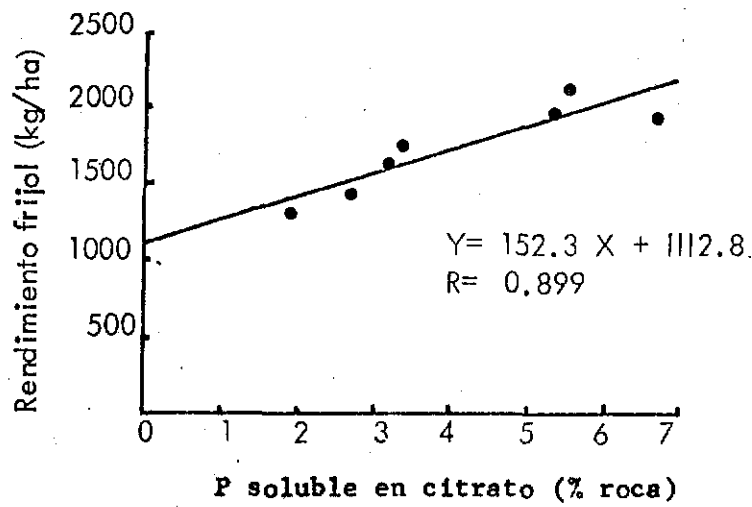


Figura 13.- Correlación entre rendimiento de frijol y el fósforo de la roca soluble en citratos.

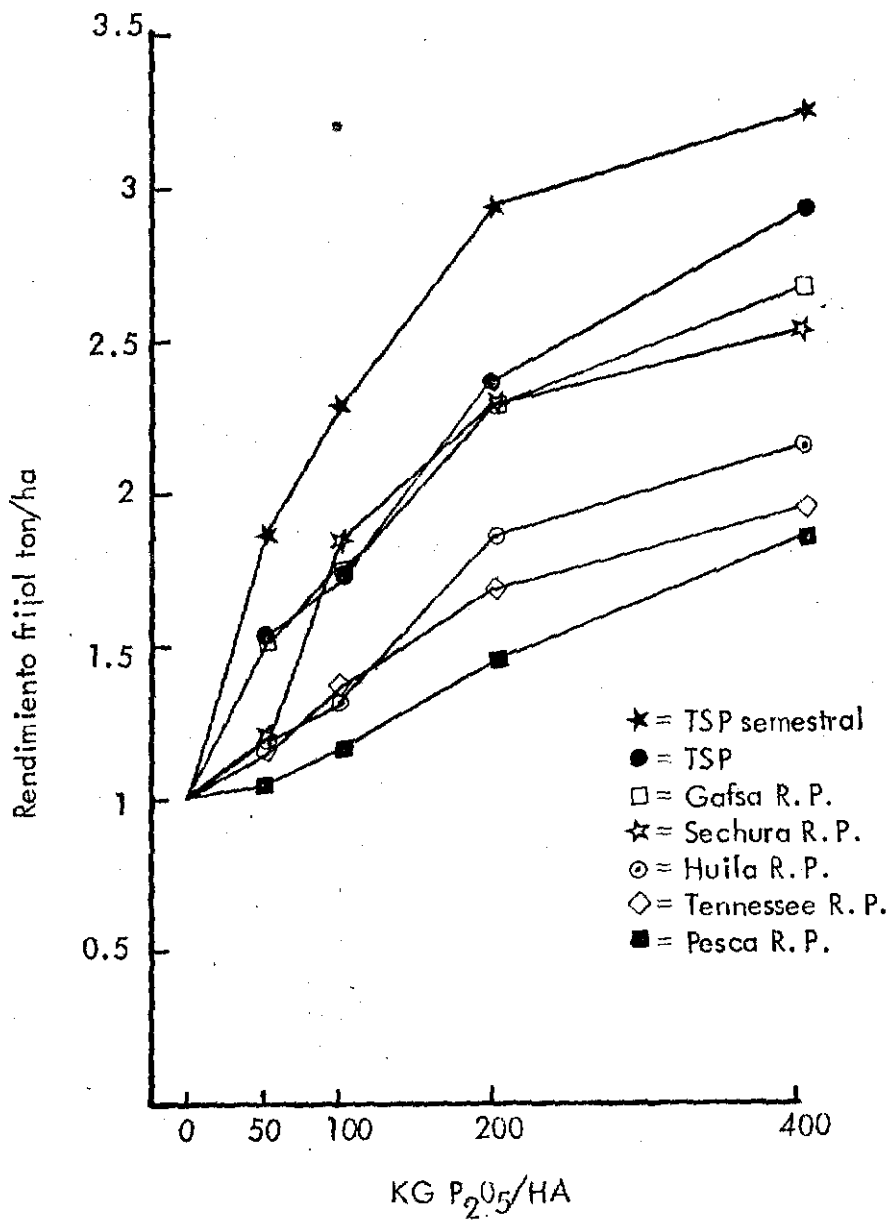


Figura 14.- Efecto residual del P aplicado como rocas fosfóricas y superfosfato triple (TSP) en el rendimiento del frijol var. Huasanó en un Andosol de "Las Guacas", Popayan. Segunda cosecha 1976B.

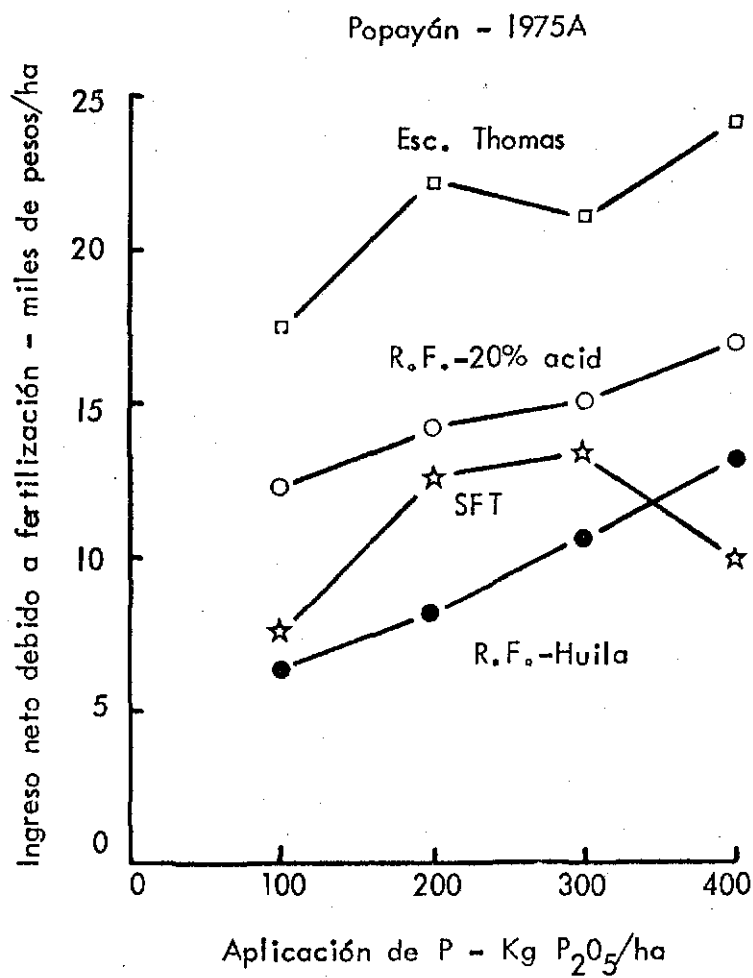


Figura 15.- Ingreso neto debido a diferentes dosis y fuentes de P en un andosol de Popayan. Frijol Huasanó.

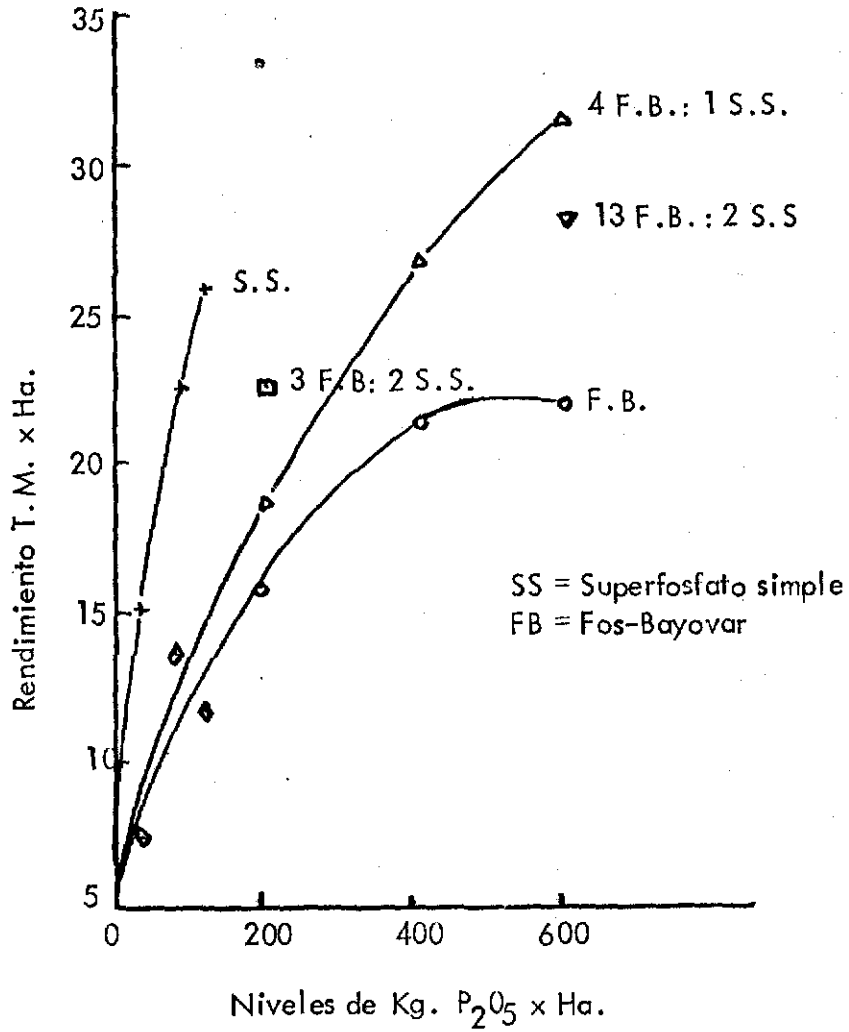


Figura 16.- Efecto comparativo de fuentes fosfatadas y proporciones de Fos-Bayovar y Superfosfato simple en el cultivo de papa, cultivar "Mariva" en la localidad de MATARA-CAJAMARCA, PERU. Campaña 1975-1976.

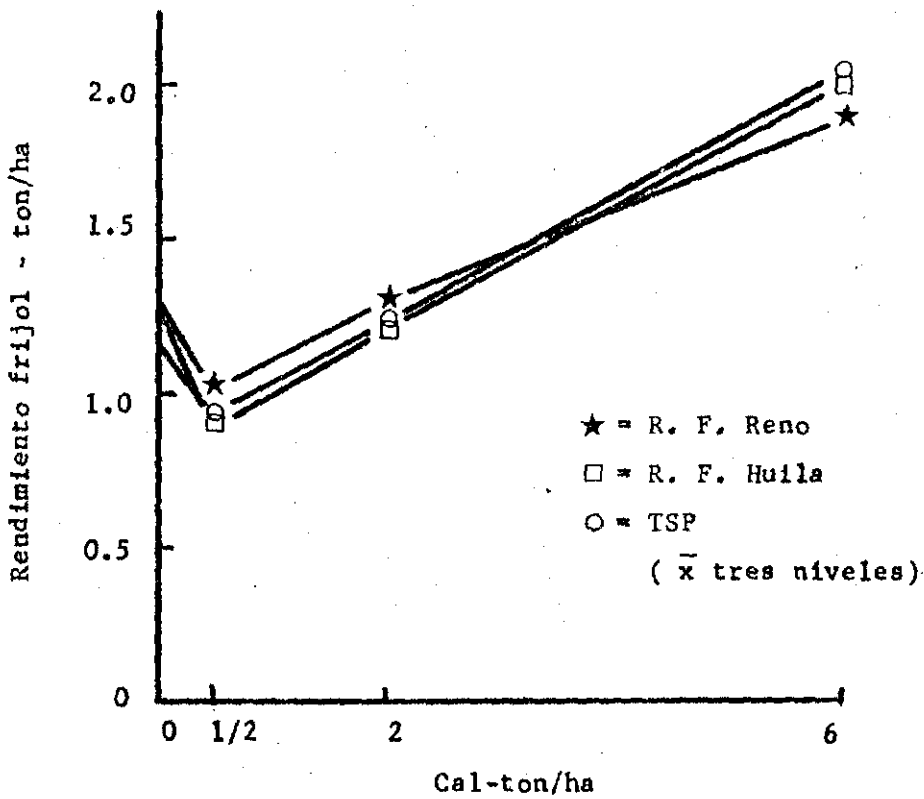
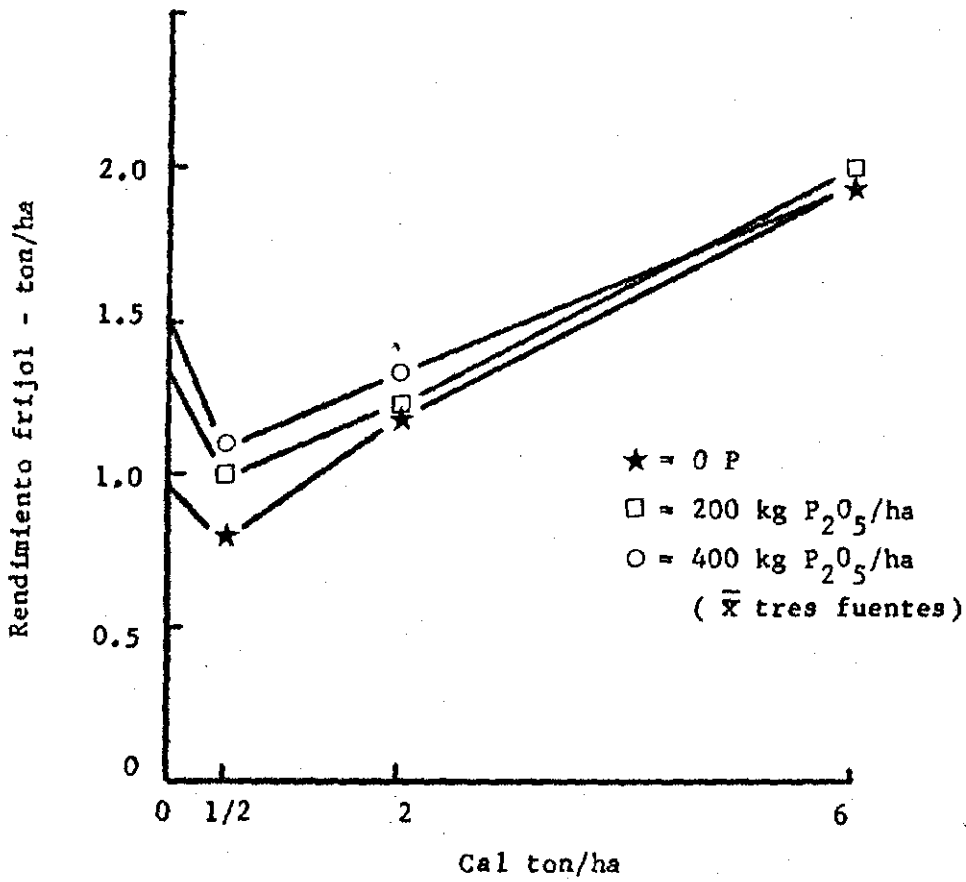


Figura 17.- Interacción P x Cal en un Andosol de Popayan. Frijol Huasanó.

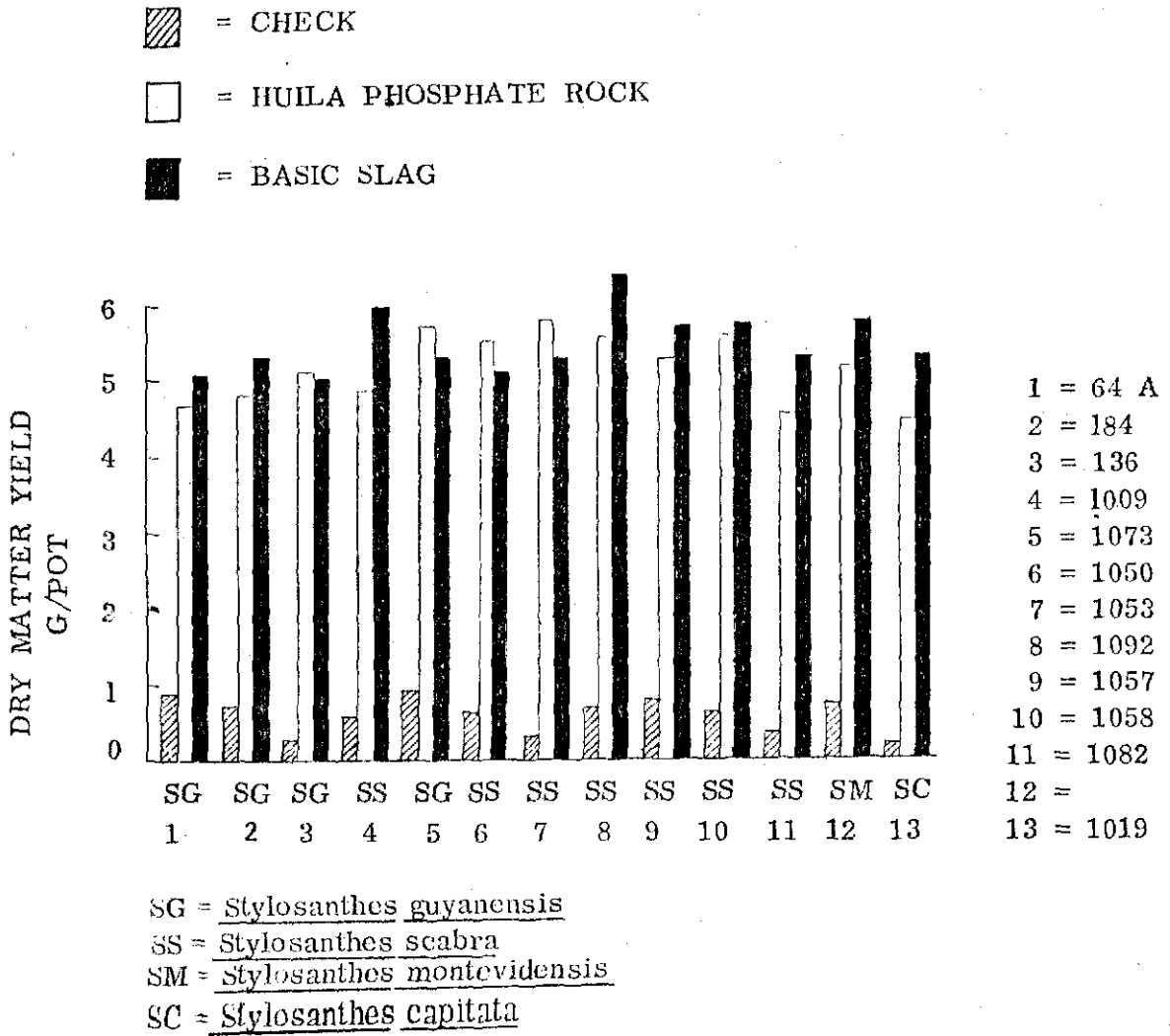


Figura 18.- Especies y ecotipos de *Stylosanthes* seleccionados en un oxisol (Carimagua) por su tolerancia a fuentes con baja (roca fosfórica) y alta (Escorias Thomas) disponibilidad de P (promedio de dos cortes del forraje).