
La experiencia del Centro Internacional para el Desarrollo de Fertilizantes en el uso de rocas fosfóricas en América Latina

Luis A. León

División Agro-Economía, IFDC. Coordinador Estudios de Fertilidad de Suelos IFDC/CIAT, Apartado 6713, Cali, Colombia.

ABSTRACT

During the last thirteen years IFDC has conducted a research program on natural and modified phosphate rocks (PR) applied in tropical soils of Latin America. This program includes: mineralogical and chemical analysis, chemical reactivity, kinetics of dissolution of PR in soils, soils factors affecting dissolution, effects of PR in exchangeable Ca and Al in soils and greenhouse and field experiments measuring crop response to natural and modified PR. The results show that many PR, even the ones with low reactivity are promising for direct application in acid soils ($\text{pH} < 5.5$), especially if the residual effect is taken into account. Modified PR can be used for annual crops with high P requirements in soils of $\text{pH} 5.5 - 6.5$, and high P fixing capacity.

Key words: IFDC, phosphate rocks, Latin America, phosphate fertilizer.

COMPENDIO

Durante los últimos trece años el IFDC ha conducido un programa de investigación integral sobre la aplicación directa de rocas fosfóricas naturales y modificadas en algunos suelos tropicales de América Latina. Dicho programa incluye: caracterización mineralógica y química de varias rocas fosfóricas; medidas de reactividad química; cinética de la disolución de las rocas fosfóricas en el suelo; factores del suelo que afectan la disolución de las rocas fosfóricas; efectos de las rocas fosfóricas en el calcio y aluminio intercambiable de los suelos y ensayos de invernadero y campo relacionados con las respuestas de los cultivos a las rocas fosfóricas molidas naturales y modificadas. La información obtenida indica que muchas rocas fosfóricas, aún las de baja reactividad, son prometedoras para la aplicación directa en suelos ácidos ($\text{pH} < 5.5$), especialmente si se reconoce su efecto residual. Rocas fosfóricas modificadas pueden usarse para cultivos de corto ciclo de vida y alto requerimiento inicial de fósforo disponible, en suelos menos ácidos ($\text{pH} 5.5 - 6.5$) y en suelos con alto poder de fijación de fósforo.

Palabras clave: IFDC, rocas fosfóricas, América Latina, abonos fosfatados.

INTRODUCCION

Los suelos ácidos de América Latina presentan problemas que impiden el desarrollo de una agricultura económicamente exitosa. Por lo general, estos suelos poseen una alta capacidad de retención de fosfatos. La aplicación directa de roca fosfórica puede ser una alternativa económicamente más atractiva para ciertos suelos y cultivos que el uso de fertilizantes solubles más costosos. Algunos países latinoamericanos poseen depósitos de rocas fosfóricas, las cuales pueden permitir ahorros de divisas si se usan para suplementar los fosfatos que comúnmente se encuentran en el mercado. Durante los últimos trece años, el Centro Internacional para el Desarrollo de Fertilizantes, IFDC, ha conducido un programa de investigación en el área del uso de rocas fosfóricas para aplicación directa en algunos suelos tropicales de América Latina. Este trabajo intenta resumir lo más sobresaliente de las investigaciones realizadas hasta la fecha.

FUENTES DE ROCAFOSFORICA

Localización

Muchos países en Latinoamérica tienen depósitos de fosfatos (Cuadro 1). Se han reportado también depósitos en otros países que no figuran en el Cuadro 1. En el programa de investigación de rocas fosfóricas del IFDC a la vez incluye rocas de depósitos que no están en América Latina, con el fin de estudiar un rango amplio de propiedades de las rocas fosfóricas y compararlas con las rocas locales.

Cuadro 1. Depósitos de roca fosfórica en América Latina.

País	Localidad	Contenido P ₂ O ₅ promedio (%)	Reservas millones de tn
Argentina	Sierra Grande	36.0	-
Bolivia	Tarija-Izayachi	-	-
	Potosí-Bentazos	-	-
	Cochabamba-Capinota	25.0	2.8
	La Paz-Caranavi	-	-
	Cerro Manomo	23-25	-
	Laguna Mondiore	-	20.0
Brasil	Minas Gerais-Tapira	8.6	710
	Sao Paulo-Jacupiranga	5.0	150
	Serrote-Guaviruva-Ipanema	607	117
	M.G. Araxá	7.0	92
	M.G. Abaeté	40.0	1
	PE-Olinda-Paulista	22.0	80
	Maranhao- Ilha-Travira	26.0	15.5
	G.O.-Catalao II	5.0	250
	M.G. Patos de Minas	10.0	450
Chile	Coquimbo-Atacama	20.0	0.5
	-	10.0	2.0
	Mejillones	6.0	56.0
	Bahía Inglesa	18.0	1.0
	Bahía Tongoy	15.0 - 18.0	1.0
Colombia	Boyacá-Iza	10.0-23.0	36.0
	Boyacá-Pesca	17.0-25.0	30.6
	Huila-Aipe	18.0 - 31.0	25.0
	Huila-Tesalia	15.0 -24.0	15.0
	Norte Santander-Sardinata	15.0 - 37.0	14.4
	Santander- Azufrada	10.0-29.0	32.7
	Tolima-Pandi	10.0 - 23.0	10.0
Ecuador	Napo - Lago Agrio	25.0 - 35.0	166 - 205
México	Zacatecas y	18.4	77.4
	Coahuila	13.3	76.4
	Sierra-Santa Rosa	11.0 - 21.0	13.5
	Sierra Carbonera	19.9	7.8
	Baja California,	-	-
	Santa Rosa-Bahía Magdalena	-	4 000
	Arroyo San Hilario	14.0	841
	San Juan de la Costa	18.0	24
	Santo Domingo	4.3	432
	Santo Domingo	4.6	643
Perú	Sechura-Bayovar	20.0	10 000
	Bayovar-Sudoeste	30.5	250
Venezuela	Lobatera	22.3	0.215
	Chiguará	27.9	-

Riecito	29.5	21
Lizardo-Calcítica	25.0	18.5
Lizardo-Alumínica	25.8	-
Jají	16.1	-
Chiguará	-	30
Monte Fresco	19.5 - 33.26	300
Navay	19.5 - 26.80	1700

COMPOSICION QUIMICA Y MINERALOGICA

El principal mineral fosfatado que se encuentra en la mayoría de las rocas fosfóricas es el apatito, pero éste varía enormemente en sus propiedades físicas, químicas y cristalográficas (Lehr *et al.*, 1967). Actualmente se puede caracterizar una roca fosfórica mediante análisis químico, difracción en polvo por rayos X, microscopía petrográfica, espectroscopía infrarroja y microscopía de electrones (McClellan, 1979). En el Cuadro 2 se presentan las fórmulas empíricas de los apatitos en algunas rocas fosfóricas representativas, determinadas de la dimensión a de la unidad de la celda usando el método de rayos X (Lehr y McClellan, 1972).

Reactividad química

En el Cuadro 3 se muestra la escala de reactividad de algunas rocas fosfóricas medida por tres de los extractores químicos más comúnmente usados en el mundo (citrato de amonio neutro, ácido cítrico al 2% y ácido fórmico al 2%). De acuerdo a consideraciones teóricas, en general la solubilidad aumenta cuando la sustitución de fosfatos por carbonatos en la estructura del apatito aumenta (Chien, 1977). Por ésto, el grado de sustituciones isomórficas en la estructura del apatito es un factor clave para determinar la reactividad química de las rocas fosfóricas que contienen carbonato apatito (Lehr y McClellan, 1972).

Cuadro 2 Unidad de celda dimensión a y las fórmulas empíricas de los apatitos en algunas rocas fosfóricas representativas.

Roca fosfórica	Longitud del eje a en Å	Fórmula empírica
Huila, Colombia	9.340	$\text{Ca}_{9.69}\text{Na}_{0.22}\text{Mg}_{0.09}(\text{PO}_4)_{5.14}(\text{CO}_3)_{0.86}\text{F}_{2.34}$
Pesca, Colombia	9.346	$\text{Ca}_{9.76}\text{Na}_{0.16}\text{Mg}_{0.07}(\text{PO}_4)_{5.28}(\text{CO}_3)_{0.72}\text{F}_{2.29}$
Bayovar, Perú	9.337	$\text{Ca}_{9.03}\text{Na}_{0.74}\text{Mg}_{0.13}(\text{PO}_4)_{4.88}(\text{CO}_3)_{1.12}\text{F}_{1.73}(\text{OH})_{0.72}$
Patos de Minas Brasil	9.370	$\text{Ca}_{9.96}\text{Na}_{0.03}\text{Mg}_{0.01}(\text{PO}_4)_{5.88}(\text{CO}_3)_{0.12}\text{F}_{2.05}$
Carolina del Norte, EE.UU.	9.322	$\text{Ca}_{9.53}\text{Na}_{0.34}\text{Mg}_{0.13}(\text{PO}_4)_{4.77}(\text{CO}_3)_{1.23}\text{F}_{2.49}$
Florida Central, EE.UU.	9.345	$\text{Ca}_{9.74}\text{Na}_{0.19}\text{Mg}_{0.07}(\text{PO}_4)_{5.26}(\text{CO}_3)_{0.74}\text{F}_{2.30}$
Tennessee, EE. UU.	9.345	$\text{Ca}_{9.85}\text{Na}_{0.11}\text{Mg}_{0.04}(\text{PO}_4)_{5.54}(\text{CO}_3)_{0.46}\text{F}_{2.18}$

Cuadro 3. Escala de reactividad de algunas rocas fosfóricas representativas, medidas por varios métodos.

	P soluble, % de la roca		
	Citrato de amonio neutro	Acido cítrico 2%	Acido fórmico 2%
Huila, Colombia	1.5 ^a	2.3	2.7
Pesca, Colombia	0.8	3.0	2.3
Bayovar, Perú	2.3	6.6	9.5
Patos de Minas, Brasil	0.8	2.3	-
Carolina del Norte, EE.UU.	3.1	6.9	11.2
Florida Central, EE.UU.	1.3	3.7	3.6
Tennessee, EE.UU.	1.1	3.8	3.0

^a Segunda extracción debida a su alto contenido de CaCO₃ (Chien y Hammond, 1978).

Reacción de las rocas fosfóricas en los suelos

Fósforo extractable por la solución de Bray I

El fósforo disponible extraído por la solución Bray I en suelos tratados con varias rocas fosfóricas después de incubación, correlaciona muy bien con la reactividad química de las rocas fosfóricas (Hammond, 1979) (Figura 1). Chien (1978) también reportó resultados similares. Sin embargo, la correlación disminuye cuando la tasa de adición de fósforo disminuye.

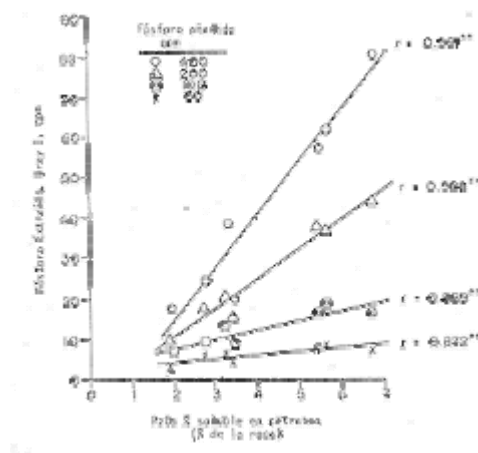


Figura 1. Relación entre el fósforo extraído por Bray I en un suelo en el invernadero y el fósforo soluble en citratos de las rocas fosfóricas (Hammond, 1979).

Hammond (1979) observó también en un experimento de campo con frijol, conducido en un Andisol ácido colombiano, que las medidas de fósforo por Bray I obtenidos 30 días después de la aplicación de este elemento correlacionaron mejor con los rendimientos de frijol en la primera cosecha, pero el fósforo extraído por Bray I al tiempo de establecer el segundo cultivo, no guardó relación con los rendimientos de la segunda cosecha.

En general, el fósforo extraído por Bray I en el suelo tratado con rocas fosfóricas aumenta cuando el tiempo de reacción aumenta, mientras que el fósforo (Bray I) disminuye con el tiempo en suelos tratados con superfosfato triple (SFT), (Figura 2) (Chien, datos sin publicar). Después de nueve semanas de incubación, el fósforo extraído por Bray I de un Oxisol ácido tratado con la roca de Bayovar (Perú), altamente reactiva, fue más o menos el mismo que el extraído del suelo con SFT.

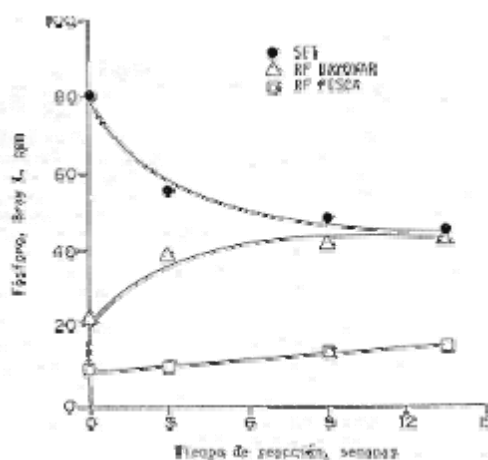


Figura 2. Fósforo extraído por Bray I en un Oxisol ácido colombiano, tratado con 200 ppm de fósforo como SFT o rocas fosfóricas durante 15 semanas de incubación (Chien, datos sin publicar).

Se debe resaltar que una cantidad apreciable de las rocas fosfóricas añadidas al suelo se puede disolver con la solución de Bray I al tiempo cero, es decir, antes de que el suelo reaccione con las rocas. De manera que el fósforo extraído con Bray I de los suelos ácidos tratados con rocas fosfóricas se derivan en parte de las rocas que no han reaccionado y también de los productos de reacción. Ambas fuentes pueden proveer fósforo aprovechable a las plantas (Chien, 1978). En el caso de los suelos tratados con SFT, la mayor fuente del fósforo extraído por Bray I son los productos de reacción. Esto puede explicar por qué se obtuvieron dos curvas distintas cuando se compararon rendimientos de la planta contra resultados de fósforo Bray I extraídos de suelos tratados con rocas fosfóricas y con SFT (Figura 3) (Hammond, 1979). En consecuencia, una recomendación de fertilizantes con SFT basada en análisis de suelos, no se puede aplicar directamente a las rocas fosfóricas.

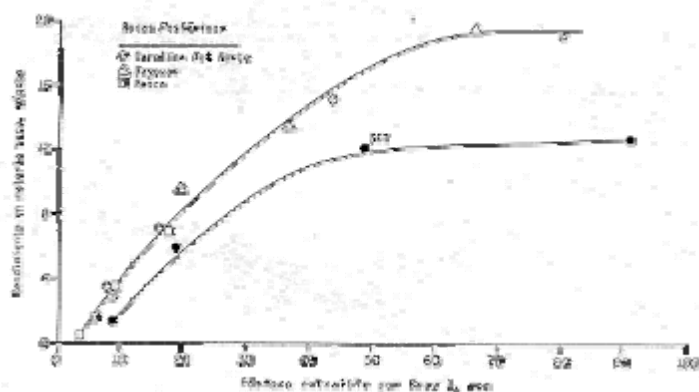


Figura 3. Relación entre el rendimiento de tres cortes de pasto guinea y el fósforo medido por Bray I, 90 días después de su aplicación a un Oxisol. (Hammond, 1979).

Comparación del método Bray I y del nuevo método Pi

Hammond *et al.* (1985) han desarrollado un nuevo método para determinar el fósforo aprovechable en suelos (Pi), mediante el uso de tiras de papel de filtro impregnado con hidróxido de hierro como colectores del fósforo en la suspensión del suelo. Recientemente, Menon *et al.* (1988b) realizaron un estudio con siete rocas fosfóricas de África y América Latina parcialmente aciduladas con H_2SO_4 al 30% o al 50%, aplicadas a un suelo ácido franco limoso. Encontraron una correlación altamente significativa entre el fósforo soluble en agua de las rocas fosfóricas parcialmente aciduladas y el fósforo medido por el Pi ($r = 0.92^{**}$). Los rendimientos en materia seca correlacionaron significativamente con el fósforo medido por el método del Pi (Figura 4) ($r = 0.91^{**}$), lo mismo que la captación de fósforo (Figura 5) ($r = 0.94^{**}$). Las correlaciones con Bray I resultaron menos significativas (0.73^{**} y 0.67^* , respectivamente). De esto se concluye que el método Bray I puede sobreestimar el fósforo disponible para las plantas cuando se aplican rocas fosfóricas parcialmente aciduladas. Estudios anteriores de Menon *et al.* (1988a) han mostrado que el método Pi tiene un buen potencial para ser usado en una amplia gama de suelos fertilizados con fuentes solubles o con rocas fosfóricas. El método Pi también trabaja bien cuando se usan como fertilizantes las rocas fosfóricas parcialmente aciduladas.

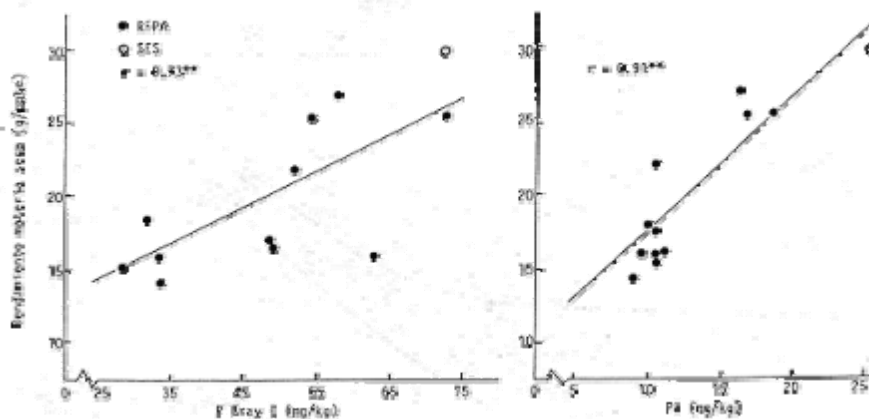


Figura 4. Materia seca de maíz relacionada con el fósforo extraído por Bray I y Pi en suelos tratados con superfosfato simple (SFS) y roca fosfórica parcialmente acidulada (RFPA).

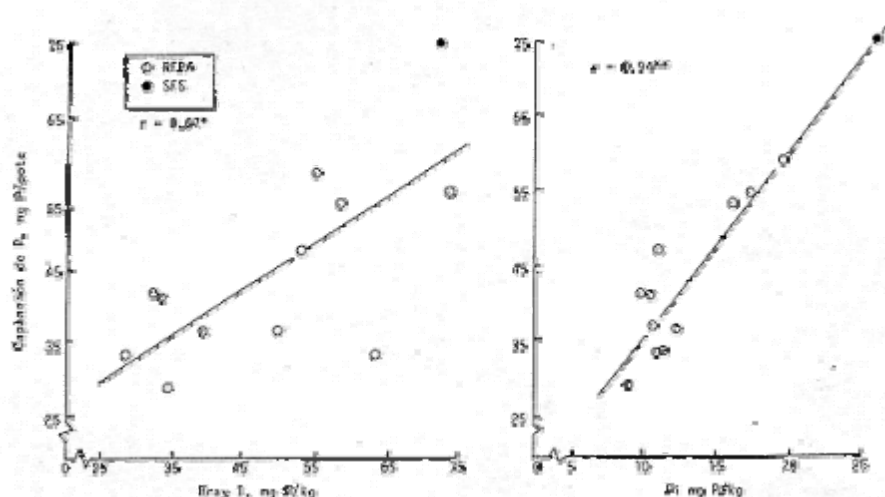


Figura 5. Captación de fósforo por maíz en relación con el fósforo extraído por los métodos de Bray I y Pi en suelos tratados con superfosfato simple (SFS) y roca fosfórica parcialmente acidulada (RFPA).

El pH del suelo y el calcio y aluminio intercambiables

Según trabajos realizados por Hammond (1979), el efecto de las rocas fosfóricas en el pH del suelo varía entre sin efecto hasta un ligero aumento en el pH de 0.2 a 0.4 unidades, dependiendo de la tasa de adición de fósforo y de la reactividad de la roca fosfórica. En un trabajo de incubación con un Oxisol de Colombia, se encontró que 90 días después de la aplicación de roca fosfórica de Bayovar, el pH del suelo aumento de 4.63 a 4.97 cuando se adicionaron 400 ppm de fósforo. Rocas fosfóricas menos reactivas (Pesca de Colombia) y SFT parece no tener efecto sobre el pH del suelo.

A pesar de que la roca fosfórica de Bayovar sólo aumenta el pH del suelo ligeramente, parece que tiene un efecto significativo en el calcio y el aluminio intercambiables. Tanto la roca Pesca, menos reactiva, como el SFT, también aumentan el calcio intercambiable, pero no modifican el aluminio. Debido al aumento en el calcio intercambiable el grado de saturación de aluminio en el suelo disminuyó con el uso de todos los fertilizantes fosfatados. El efecto en la saturación de aluminio fue más pronunciado con el tratamiento de la roca Bayovar que con el SFT. En consecuencia, se debe considerar un posible efecto benéfico en cuanto al calcio y aluminio intercambiables cuando se usan rocas fosfóricas relativamente reactivas para aplicación directa en suelos ácidos tropicales para la producción de cultivos.

Evaluación agronómica de rocas fosfóricas nativas y modificadas por acidulación parcial o compactación

Durante los pasados trece años, la investigación de campo del IFDC en América Latina, con sede en el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) en Cali, Colombia, ha estado dirigida a la búsqueda de formas efectivas y racionales de utilización de las rocas fosfóricas nativas, con el fin de suplir total o parcialmente las necesidades de fertilizantes fosfatados.

Mediante una red cooperativa latinoamericana de ensayos de campo, se ha logrado identificar las mejores prácticas de manejo de las rocas molidas, de las parcialmente aciduladas y actualmente de las compactadas. Esta red que ha funcionado hasta el presente y que incluye a Bolivia, Colombia, Costa Rica, Ecuador, México, Perú, Brasil, Cuba y Venezuela, demostró en diversos ensayos con varios cultivos que la roca fosfórica parcialmente acidulada puede ser la solución para tener un fertilizante fosfatado más barato, pero tan efectivo como los convencionales solubles en agua. Actualmente se estudian en Colombia y Bolivia alternativas para el uso agronómico de rocas fosfóricas que aparentemente no son adecuadas para obtener fertilizantes fosfatados de buena calidad cuando se acidulan parcialmente. Una buena alternativa parece ser la compactación de las rocas

fosfóricas problema con fosfatos solubles tales como SFT, SFS, fosfato monoamónico (MAP) o fosfato diamónico (DAP).

Rocas fosfóricas nativas

La efectividad agronómica relativa (EAR) de una roca fosfórica para aplicación directa es función de factores que afectan el sistema roca-suelo-prácticas culturales (Peng y Hammond, 1979). Un ejemplo fueron las diferencias en la respuesta de un cultivo a las aplicaciones de varias rocas fosfóricas reportadas por Fenster y León (1979) (Figura 6). Fuera de la alta capacidad de retención de fósforo del suelo, la deficiencia de calcio como nutrimento y la toxicidad del aluminio pueden ser los responsables del pobre rendimiento del SFT comparado con los de las rocas fosfóricas de Bayovar y Carolina del Norte.

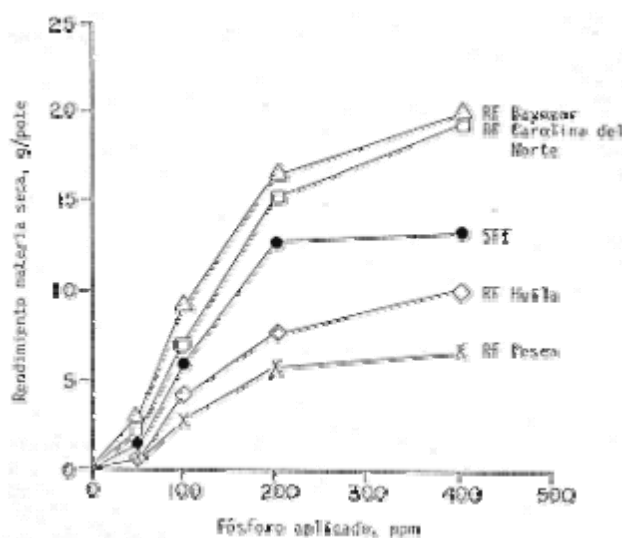


Figura 6. Efecto en invernadero de las fuentes de fósforo en los rendimientos de materia seca de *Panicum maximum* (suma de tres cortes) en un Oxisol de Carimagua, Colombia, sin encalar (Fenster y León, 1979).

El efecto de la solubilidad de citratos y el tipo de cultivo en la EAR inicial en experimentos en suelos colombianos, se muestra en la Figura 7 (Hammond, 1979). El factor que exhibe una influencia primaria es la reactividad de la roca fosfórica. En estos cuatro experimentos las rocas fosfóricas de alta solubilidad en citratos son casi tan efectivas como el SFT, especialmente en el caso de la producción de frijoles. En el segundo y tercer cultivo de frijoles (Figura 8) las rocas altamente reactivas fueron más efectivas que el SFT (Hammond, 1979). Mejoramiento en la eficiencia se observó con rocas de media y baja solubilidad en citratos en el período extendido del cultivo. Debido a este mejoramiento con el tiempo, se puede ver que la calificación de efectividad basada en una primera cosecha no es suficiente. Otro experimento a largo plazo conducido en Colombia, mostró que los rendimientos acumulados de 13 cortes de *Brachiaria decumbens* hechos en un período de 44 meses, obtenidos con rocas fosfóricas, fueron comparables con el del SFT, aún con rocas de baja reactividad como Pesca de Colombia (Hammond *et al.*, 1982).

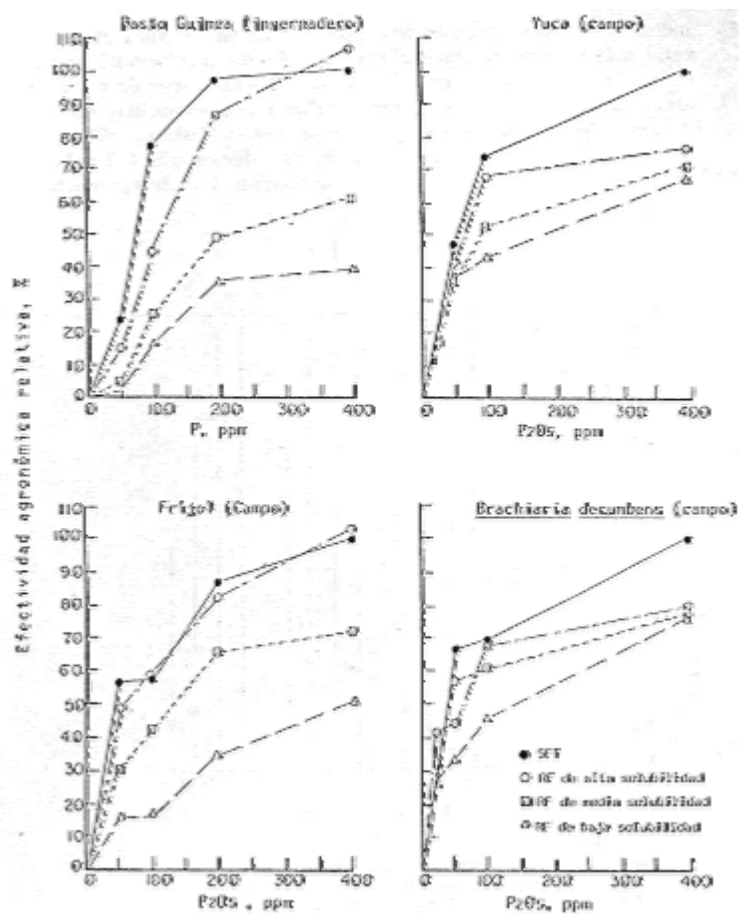


Figura 7. Efectividad agronomica relativa de diferentes fuentes de fósforo (Hammond, 1979).

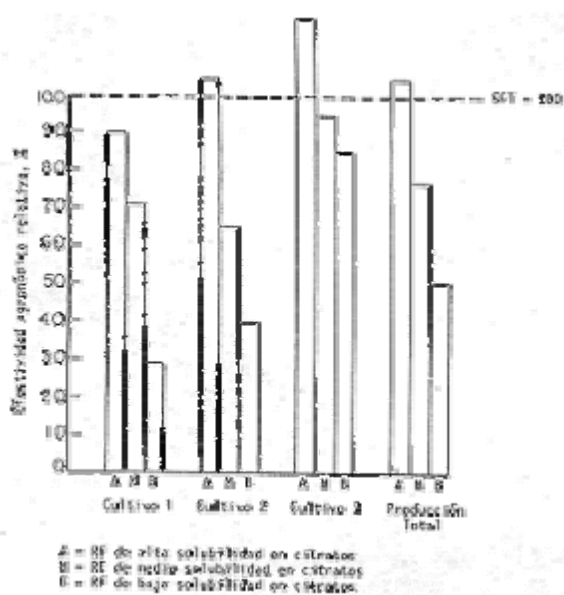


Figura 8. Efectividad agronomica relativa de varias fuentes de fósforo con frijol en un Andisol de Popayán, Colombia (Hammond, 1979).

Rocas fosfóricas modificadas por acidulación parcial o por compactación

Ensayos realizados en varios países latinoamericanos indican que no siempre se obtienen resultados satisfactorios cuando se aplican directamente rocas fosfóricas molidas (León y Arregocés, 1987), especialmente cuando se usan en cultivos de corto período y/o en suelos con relativamente alto pH y alto poder de fijación de fósforo. La acidulación parcial con H_2SO_4 de las rocas fosfóricas o la compactación de una roca con fertilizantes fosfatados solubles representan alternativas para producir fertilizantes fosfatados agrónomicamente y económicamente efectivos, a partir de fuentes fosfatadas nativas que de otra manera no podrían ser usadas como fertilizantes (León y Arregocés, 1987). Sin embargo, los resultados agronómicos obtenidos con ciertas rocas fosfóricas parcialmente aciduladas de África y Latinoamérica (Capinota, Bolivia), no han sido muy satisfactorios. (Hammond *et al.*, 1989). Un trabajo realizado por Hammond *et al.* (1989), indicó que el alto contenido de $Fe_2O_3 + Al_2O_3$ en una roca, afecta la calidad de la roca parcialmente acidulada. Como una alternativa para utilizar rocas fosfóricas con altos contenidos de óxidos de hierro y aluminio, el IFDC está actualmente realizando ensayos de invernadero (Chien y Menon, sin publicar) y de campo (León y Restrepo, 1990) con productos compactados de mezclas de rocas fosfóricas y SFT. También en el campo se está estudiando el efecto residual de dichos productos.

Un aspecto interesante que estudian Chien *et al.* (1987) es el efecto que produce la úrea cuando se compacta con rocas fosfóricas o con rocas y SFT. Parece que la hidrólisis de la úrea puede ser beneficiosa en aumentar la aprovechabilidad del fósforo de las rocas fosfóricas en suelos con contenidos medios a altos de materia orgánica.

A pesar de lo adelantada que se encuentra la investigación, se necesita más trabajo para evaluar las propiedades de los fertilizantes compactados, especialmente en el área de compatibilidades físicas, su efectividad agronómica (especialmente en el campo y su efecto a largo plazo) y estudios económicos en cuanto a la tecnología de compactación.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Chien, S.H. 1977. Thermodynamic Considerations on the Solubility of Phosphate Rock. *Soil Sci.*, 123:117-121.
2. Chien, S.H. 1978. Interpretation of Bray I Extractable Phosphorus From Acid Soil Treated With Phosphate Rocks. *Soil Sci.*, 126:3- 39.
3. Chien, S.H. y L.L. Hammond. 1978. A Comparison of Various Laboratory Methods for Predicting the Agronomic Potential of Phosphate Rocks for Direct Application. *Soil Sci. Amer. J.*, 42:935-939.
4. Chien, S.H.; D. Sompongse; J. Henao y D.T. Hellums. 1987. Greenhouse Evaluation of Phosphorus Availability from Compacted Phosphate Rocks with Urea or With Urea and Triple Superphosphate. *Fertilizer Research* 14:245-256.
5. Fenster, W.E., y L.A. León. 1979. Utilization of Phosphate Rock in Tropical Soils of Latin America, Seminar on Phosphate Rock for Direct Application, p. 174-210. Special Publication IFDC-S1, International Fertilizer Development Center (IFDC), Muscle Shoals, Alabama, EE.UU.
6. Hammond, L.L. 1979. Agronomic Measurement of Phosphate Rock Effectiveness, Seminar on Phosphate Rock for Direct Application, p. 147-173. Special Publication IFDC-S1, International Fertilizer Development Center (IFDC), Muscle Shoals, Alabama, EE.UU.
7. Hammond, L.L.; L.A. León y L.G. Restrepo. 1982. Efecto residual de las aplicaciones de 7 fuentes de fósforo sobre el rendimiento de las aplicaciones de *Brachiaria decumbens* en un Oxisol de Carimagua. En Silva F. (ed.) *Uso y Manejo de los suelos de la Orinoquía y la Amazonía. Memorias del VII Coloquio de Suelos - Villavicencio. Suelos Ecuatoriales. SCCS (Colombia) Volúmen XII, No. 2.*
8. Hammond, L.L.; R.G. Menon, y H.A. Sissingh. 1985. Determination of plant-available phosphorus with Ppv1pv soil test. 1985. *Agron. Abstr.* pp. 173.

9. Hammond, L.L.; S.H. Chien; A.H. Roy y A.U. Mokwunye. 1989. Solubility and Agronomic Effectiveness of Partially Acidulated phosphate Rocks as influenced by their iron and aluminum oxide content. Fertilizer Research, FRES 707:1-16.
10. Lehr, J.R.; G.H. McClellan J.P. Smith, y A.W. Frazier. 1967. Characterization of Apaties Commercial Phosphate Rocks, Proc. Intern. Collog. Inorg. Phosphates. 12:29-44.
11. Lehr, J.R., y G.H. McClellan. 1972. A Revised Laboratory Reactivity Scale for Evaluating Phosphate Rocks for Direct Application, Bulletin Y-43. tennessee Valley Authority (TVA), Muscle Shoals, Alabama, EE.UU.
12. León, L.A. y O. Arregocés (Ed.) 1987. Alternativas Sobre el Uso como Fertilizantes de Fosfatos Nativos en América Tropical y Subtropical. Memorias del Seminario Celebrado en CIAT, Colombia, 4 a 6 de noviembre, 1987. CIID, IFDC, CIAT, Documento de Trabajo No. 46. CIAT, Cali, Colombia.
13. León, L.A. y L.G. Restrepo. 1990. Evaluación agronómica de rocas fosfóricas parcialmente aciduladas y rocas fosfóricas compactadas con fertilizantes fosfatados solubles. pp. 5-10. En Silva (ed.). La Fertilización en la Agricultura Contemporánea. Suelos Ecuatoriales, SCCS (Colombia) Volúmen XX, No. 2
14. McClelland, G.H. 1979. Mineralogy and Reactivity of Phosphate Rocks, Seminar on Phosphate Rocks for Direct Application, pp. 57-81. Special Publication IFDC-S1, International Fertilizer Development Center (IFDC), Muscle Shoal, Alabama, EE.UU.
15. Menon, R.G.; L.L. Hammond y H.A. Sissing. 1988a. Determination of plant-available phosphorus by the iron hidroxide impregnated filter paper (Pi) soil test. Soil Sci. Soc. Am. J. (In press) .
16. Menon, R.G.; S.H. Chien, y L.L. Hammond. 1988b. Comparison of Bray I and Pi test for evaluating plant-available phosphorus from soil treated with different partially acidulated phosphate rocks. Plant and Soil. PLSO 7836: 1-6
17. Peng, P., y L.L. Hammond. 1979. Ground and Granulated Phosphate Rock for Direct Application, Proc. Seventeenth Tech. Conference, New Zealand Fertilizer Manufacturers' Research Meeting, pp. 157- 174, University of Auckland, Nueva Zelandia.