

15834

~~SECRETARIA AGRICULTURA~~
~~DE COLOMBIA~~

ALTERNATIVAS SOBRE EL USO COMO FERTILIZANTES DE FOSFATOS NATIVOS EN AMERICA TROPICAL Y SUBTROPICAL

ANALIZADO

Memorias del Seminario Celebrado en CIAT, Colombia
4 a 6 de Noviembre, 1987

- CIID, Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo.
IFDC, Centro Internacional para el Desarrollo de Fertilizantes.
CIAT, Centro Internacional de Agricultura Tropical.

15834

ALTERNATIVAS SOBRE EL USO COMO FERTILIZANTES
DE FOSFATOS NATIVOS EN AMERICA TROPICAL
Y SUBTROPICAL

~~BIBLIOTECA AGROPECUARIA~~
BIBLIOTECA

BIBLIOTECA AGROPECUARIA
RE
27 ABO 1971

Memorias

Editadas y Compiladas por:
L.A. León y D. Arregocés

Impresas por: Unidad de Artes Gráficas del Centro
Internacional de Agricultura Tropical, CIAT.
Palmira, Colombia, S.A.

Con financiación del Centro Internacional de Investigaciones
para el Desarrollo, CIID.

13. USO POTENCIAL DE ROCAS FOSFORICAS Y DE ROCAS FOSFORICAS
PARCIALMENTE ACIDULADAS EN LA AGRICULTURA
COLOMBIANA

Adolfo Martínez ^{R.}
Luis A. León ^{Saxminto}
Jaime Navas ^{HUETA}

RÉSUMEN

En 1977 el IFDC, con ayuda económica del CIID del Canadá, iniciaron el llamado "Proyecto Fósforo". El objetivo general de este proyecto está relacionado con investigación dirigida a identificar prácticas de fertilización en suelos ácidos e infértiles de América Tropical, utilizando recursos nativos de la región. Debido a que el fósforo es el nutrimento limitante más importante de la región, el proyecto ha dedicado gran parte de sus recursos a identificar prácticas y materiales nativos para solucionar este problema. Las actividades del proyecto han sido llevadas a cabo con la colaboración y apoyo del "Instituto Colombiano Agropecuario" (ICA). Este documento presenta en forma de resumen los resultados de la evaluación agronómica y económica de diferentes fuentes de P en varios cultivos y bajo diversas condiciones agro-climáticas de Colombia. A través del trabajo realizado por el proyecto se han identificado prácticas de aplicación (método y tiempo de aplicación), y fuentes de P (roca fosfórica molida y roca fosfórica parcialmente acidulada), las cuales pueden ser utilizadas por los agricultores y obtener beneficios económicos similares a aquellos obtenidos con fertilizantes convencionales (Super Fosfato Triple, Fosfato Di-Amónico y productos NPK). Este documento identifica en el país, en forma general, cultivos y áreas agro-climáticas homogéneas, donde diferentes fuentes de P producidas con materiales domésticos, pueden ser utilizadas efectivamente por agricultores.

*Economista Agrícola, International Fertilizer
Development Center.

*Científico de Suelos, International Fertilizer
Development Center.

*Director, Programa Nacional de Suelos, ICA, Bogotá,
Colombia.

Introducción

Este documento presenta en forma resumida los resultados de la investigación obtenidos por el Proyecto Fósforo IFDC/CIAT, relacionados con la evaluación agronómica y económica de fuentes de fósforo (P), las cuales ayudan a identificar áreas y prácticas de fertilización de cultivos.

En la determinación del uso potencial de un fertilizante, nuevo o modificado, en la producción agrícola de un país o región, la investigación agronómica, acompañada por una apropiada evaluación económica juegan un papel muy importante. Los resultados de la investigación presentados se refieren a:

1. La evaluación agronómica de la RF molida, en aplicación directa.
2. La evaluación agronómica de la RFPA con ácido sulfúrico, y
3. La evaluación agronómica de diferentes fuentes de P soluble (SFT) solas o en mezcla con RF.

La RF molida es el fertilizante más elemental que se puede hacer con RF. La RFPA es RF molida tratada con sólo una fracción del ácido sulfúrico (generalmente del 30 al 50%) requerido para convertir completamente el fosfato insoluble a fosfato monocálcico soluble en agua o para hacer superfosfato simple (SFS). La acidulación de la RF también puede hacerse con ácido sulfúrico, hidrociorhídrico, fosfórico o nítrico.

Los resultados presentados han sido obtenidos de reportes anuales y de publicaciones técnicas preparadas como parte de las actividades del Proyecto. Por simplicidad, y en vista de la gran cantidad de datos, se decidió seleccionar experimentos individuales representativos y experimentos combinados para ilustrar los resultados obtenidos y los conceptos discutidos.

Investigaciones conducidas por el Proyecto relacionadas con el uso de la RF como fuente de P, han indicado que los cultivos responden en forma similar a las RF de Huila y Pesca. Las rocas de Iza y de Media Luna, son muy similares a las rocas de Pesca y Huila respectivamente, pero aunque no han sido ensayadas en el campo debido a su falta de disponibilidad en el mercado, se estima que se comportan similarmente. La RF de Sardinata, la cual tiene un contenido de P_2O_5 más alto, pero menos carbonatos reemplazando fosfatos en la estructura del cristal de apatita, es menos reactiva, debido a esto su eficiencia agronómica es inferior a la de otras rocas.

Las recomendaciones aquí hechas para el uso de RF molida para aplicación directa se refieren a la roca fosfórica molida de Huila, Pesca y posiblemente Iza y Media Luna.

Con respecto a la RFPA de las diferentes fuentes, los resultados presentados incluyen investigaciones de campo de productos manufacturados con rocas de Huila y Pesca, las cuales tienen propiedades similares. Las RF de Iza y Sardinata aciduladas para obtener la misma cantidad de P soluble deberían poseer propiedades agronómicas similares. También están incluidos los resultados de la mezclas de RF con DAP y SFT, las cuales simulan los productos parcialmente acidulados. Estas mezclas fueron preparadas para obtener la misma cantidad de P soluble de un producto parcialmente acidulado.

Evaluación de la RF Molida

Uno de los principales objetivos del Proyecto Fósforo IFDC/CIAT ha sido la identificación de suelos, cultivos, condiciones agroclimáticas y prácticas de manejo, bajo las cuales las RF nativas puedan ser utilizadas efectivamente como fertilizantes. Las investigaciones conducidas por el Proyecto indican que el uso de la RF molida para aplicación directa es recomendable sólo bajo condiciones específicas. Se ha encontrado que los siguientes factores juegan un papel muy importante en la determinación de la efectividad agronómica de la RF:

1. La reactividad química de la roca.
2. El tamaño de la partícula de la roca.
3. Las propiedades del suelo y el clima de la región.
4. El tiempo y el método de aplicación.
5. El cultivo y los sistemas de producción utilizados.
6. El efecto residual de la roca.
7. El uso de la roca como un corrector del suelo.

Los siguientes parágrafos se refieren a los resultados de la investigación obtenidos para cada uno de los factores arriba mencionados.

Reactividad Química

La reactividad de la RF puede ser evaluada por la cantidad del P total que tiene soluble en citrato de amonio neutro, en ácido cítrico (2%), en ácido fórmico (2%), o en citrato de amonio ácido pH = 3. La relación entre la reactividad de

la roca y la respuesta de los cultivos ha sido reportada por Leon y Hammond, 1984. Estas investigaciones clasifican 11 RF latinoamericanas en cuatro grupos de acuerdo con su efectividad agronómica relativa (EAR).^a Para esta clasificación *Panicum maximum* fue el cultivo utilizado en un Oxisol de los Llanos Orientales colombianos. Las 11 RF latinoamericanas fueron clasificadas en comparación con el SFT como: de calificación alta, EAR de 85-100%, de calificación mediana, EAR de 70-84%, de calificación baja, EAR de 40-69%, y de calificación muy baja con EAR menor del 39%.

De acuerdo a esta clasificación las RF colombianas Huila y Pesca son de calificación media y la Sardinata de calificación baja. La roca de Iza no fue incluida en esta clasificación debido a que no estaba disponible, pero de acuerdo a su composición química puede ser clasificada como las rocas de Huila y Pesca.

Tamaño de la Partícula

Experimentos conducidos por el Proyecto Fósforo IFDC/CIAT han mostrado que las RF son más efectivas cuando la superficie de contacto entre las partículas de la roca y el suelo es maximizada para promover la disolución de la roca (León y Hammond, 1984). Resultados experimentales de la investigación confirman que la roca finamente molida (mayor de 100 mesh) o minigranulada (-50 +150 mesh) es más efectiva que la roca en partículas de mayor tamaño (granular).

Propiedades del Suelo y Clima de las Regiones

Las propiedades químicas y físicas de la RF son factores importantes para determinar su efectividad agronómica. Sin embargo, las características buenas de la roca no garantizan una respuesta de los cultivos. A través de investigaciones conducidas por León y Hammond (1984) y por Hughes y Gilks (1986), se ha encontrado que de todas las características del suelo, el pH, la cantidad de P disponible o calcio intercambiable, y la capacidad de fijación de P juegan un papel muy importante en la efectividad agronómica de la RF.

En el caso de las rocas de Huila y Pesca, se ha determinado que se desempeñan mejor en suelos ácidos (pH de 5.5 o menos) con una capacidad de fijación de P de menos del 45% (medida por el método de Fashbender 1967) y con un contenido de P de menos de 5 ppm Bray 1.

^a EAR = $\frac{\text{Rendimiento del producto ensayado} - \text{control}}{\text{Rendimiento del producto estándar} - \text{control}} \times 100$

Resultados obtenidos en estaciones experimentales y en campos de agricultores con RFH, han mostrado que las rocas pueden ser menos efectivas en los suelos Andepts e Inceptisoles oxícos de Cundinamarca, Boyaca, Cauca y Nariño, que cuando son aplicados a Oxisoles de los Llanos Orientales (Meta), y Ultisoles de Santander de Quilichao (Cauca), los cuales son más ácidos, más bajos en calcio, y exhiben una capacidad de fijación de P más baja. En los Oxisoles y Ultisoles, la RF puede llegar a tener hasta el 90% de la efectividad del SFT, mientras que en los Andepts y en los Inceptisoles su efectividad puede ser tan baja como del 5 al 10%. Un ejemplo representativo de los resultados experimentales obtenidos con papa, arroz, caupi, maíz y frijol utilizando esta roca en estos suelos aparece en el Cuadro 1. Los resultados, (Cuadro 1 y siguientes) son presentados en términos de la efectividad o eficiencia agronómica relativa (EAR), utilizando SFT como referencia. El Cuadro 1 también incluye el rendimiento de las parcelas de control, el cual es útil para medir los aumentos de rendimiento debido al uso de fertilizante, y tener una idea de la fertilidad natural de los suelos en los cuales los experimentos han sido conducidos.

Los resultados experimentales presentados en el Cuadro 1 indican que la efectividad agronómica de las RF Huila y Pesca exhibe grandes fluctuaciones. La RF ha dado resultados consistentemente buenos en los suelos Andepts en Nariño, los cuales tienen un alto contenido de P. Estos suelos han sido fuertemente fertilizados con NPK por muchos años y tienen un alto contenido de P disponible, lo que los hace diferentes de los Andepts de Cundinamarca y Boyacá.4

A través de los experimentos conducidos, se ha notado que el clima (temperatura y lluvia) influye en la respuesta de los cultivos a las aplicaciones de RF. En las tierras bajas de los trópicos y las de mediana altitud (0-1000 y 1000-2000 msnm, respectivamente), con temperaturas promedios de más de 24°C y entre 18 y 24°C, los cultivos responden a las aplicaciones de RF, siempre y cuando las condiciones químicas del suelo sean adecuadas para la disolución de la roca. En estas dos regiones donde la efectividad agronómica de la RF fue alta, el clima fue clasificado como subhúmedo (1000 a 2000 mm/año). La alta temperatura del suelo y la adecuada cantidad de humedad favorecen la disolución de la roca.

En el trópico alto y muy alto, 2000 a 3000 msnm y de 3000-4000 msnm respectivamente, con temperaturas anuales que varían de 12° a 18°C y de 6° a 12°C respectivamente donde la papa, el trigo, y la cebada son cultivadas, el promedio anual de lluvia varía entre 500 y 1000 mm/año. Recientes experimentos con papa conducidos por el IFDC y el ICA en

Cuadro 1. Efectividad Agronómica Relativa (EAR) de la RFH y RFP* en varios cultivos y tipos de suelo.

Fuente de P	Localización	Tipo de Suelo	Cultivo/Dosis (kg P/ha)	Rendimiento ^a (kg/ha)	EAR (%)
SFT	Tausa, Cund.	Andept	Papa	24033	100
RFH			150	2700	7
Control				1066	
SFT	Ipiates, Nariño	Andept	Papa ^a	24628	100
RFH			180	22321	76
Control				15003	
SFT	Ipiates, Nariño	Andept	Maíz/Frijol ^b	7315	100
RFH			60	7135	92
Control				4863	
SFT	C/magua, Meta	Oxisol	Arroz secoano	4819	100
RFH			40	4795	99
Control				1172	
SFT	V/cencio, Meta	Oxisol	Arroz riego	5510	100
RFH			25	4929	51
RFP				4996	57
Control				4314	
SFT	C/magua, Meta	Oxisol	<u>B. decumbens</u>	32400	100
RFH			44	31750	96
RFP				35950	120
Control				14400	
SFT	Q/chao, Cauca	Ultisol	Maíz	4491	100
RFH			87	3370	40
Control				2617	
SFT	Pescador, Cauca	Inceptisol	Maíz	872	100
RFH			50	111	13
Control				0	
SFT	Pescador, Cauca	Inceptisol	Frijol	1089	100
RFH			140	308	27
Control				45	
SFT	Caldono, Cauca	Inceptisol	Yuca ^c	23232	100
RFH			82	12631	54
Control				10300	

*RFH = RF Huila; RFP = RF Pesca.

a. Promedio de 5 experimentos.

b. Promedio de 9 experimentos. Rendimiento expresado en equivalentes de maíz.

c. Promedio de 3 experimentos.

estas dos regiones indican que una mejor respuesta fue obtenida en la región alta que en la región muy alta. Apparently la temperatura muy fría del suelo no favorece la disolución de la roca.

Tiempo y Método de Aplicación

Investigaciones conducidas en granjas experimentales y en campos de agricultores han demostrado que rendimientos altos se obtienen aplicando SFT en el sitio al momento de la siembra. Cuando la RF es utilizada como fuente de P, rendimientos más altos se logran aplicando la roca al voleo, incorporada, y preferiblemente 30 días antes de la siembra. El Cuadro 2 presenta los resultados de 3 experimentos (frijol, papa y maíz) que compara métodos y momentos de aplicación que ilustran las afirmaciones anteriores.

La aplicación de la RF al voleo e incorporada 30 días antes de la siembra no es muy práctica en tierras muy empinadas y sujetas a erosión. En estas áreas, donde la labranza mínima es ampliamente utilizada, la RF puede ser aplicada a un volumen reducido de suelo. También, la aplicación de fertilizante 30 días antes de la siembra promueve el desarrollo de malezas. Estas dos limitaciones en la utilización de RF deben ser cuidadosamente evaluadas antes de efectuar recomendaciones específicas para estas áreas.

Cultivo y Sistema de Producción Utilizado

Resultados de la investigación indican que aún bajo condiciones apropiadas de suelo, la RF es más efectiva cuando es utilizada en cultivos tales como pastos, leguminosas forrajeras, caupi, maní, y arroz, que cuando es utilizada en cultivos tales como maíz, frijol y papa. Las razones para esto están relacionadas en parte, con las condiciones climáticas (temperatura, lluvia), con la duración del ciclo de vida y con la habilidad de las plantas para asimilar el P del suelo.

El Cuadro 1 presenta los resultados de la investigación de experimentos conducidos con arroz, caupi, yuca, pastos, maíz y papa, en diferentes regiones agroclimáticas de Colombia. Como este cuadro lo muestra, la efectividad agronómica relativa de la RF varía desde 120% para pastos en Carimagua hasta 13% para maíz en Pescador, Cauca y 7% para papa en Tausá, Cundinamarca.

Efecto Residual

Otro factor que debe ser considerado en la evaluación agronómica de cualquier fuente de P es su efecto residual. Investigaciones conducidas por el Proyecto utilizando

Cuadro 2. Efecto del método y tiempo de aplicación de RFH y SFT.

Fuente de P	Localización	Método de Aplicación	Cultivo/Dosis (kg P/ha)	Rendimiento (kg/ha)	EAR (X)
SFT	Tausa, Cund.	En Sitio	Papa	24033	100
RFH		Al Voleo	150	2700	7
RFH		En Sitio		2600	7
Control				1066	
SFT	Pescador, Cauca	En Sitio	Frijol	1203	100
SFT		Al Voleo	100	1141	95
RFH		En Sitio		384	28
RFH		Al Voleo		508	39
Control			68		
SFT	Pescador, Cauca	En Sitio	Maiz	872	100
SFT		Al Voleo	50	710	81
RFH		En Sitio		87	10
RFH		Al Voleo		111	13
Control			0		
SFT	Pescador, Cauca	A La Siembra	Frijol	1101	100
SFT		30 días AS	100	856	78
RFH		A La Siembra		487	44
RFH		30 días AS		502	46
Control			0		
SFT	T/rras, Nariño	En Sitio	Papa	46013	100
RFH		Al Voleo	150	41951	56
RFH		En Sitio		41193	47
Control				36837	

RECIBIDA

Brachiaria decumbens han indicado que las RF de reactividad media, como la del Huila, aumentan su eficiencia agronómica a través del tiempo y su efecto residual es igual al del SFT para el tercer cultivo. En el caso de rocas con reactividad un poco más baja, como la de Pesca, su eficiencia agronómica aumenta durante los primeros tres cultivos y se ha notado que llegan a alcanzar el 82% de la reactividad agronómica del SFT al tercer año.

Experimentos conducidos para medir el efecto residual del SFT y de la RFH, en rotaciones de cultivos como frijol/maíz/trigo y papa/trigo/trigo han indicado que no hay diferencias en el efecto residual de estas fuentes (IFDC/CIAT, 1986). Los resultados de la investigación indican claramente que en lugares donde la efectividad agronómica de la RF es igual a la del SFT, esta efectividad permanece constante a través del tiempo. En otras palabras, a medida que disminuyen los rendimientos de los cultivos obtenidos con el SFT en los cultivos subsecuentes, lo mismo sucede a los rendimientos obtenidos con las RF. También en suelos donde la RF no es tan efectiva como el SFT durante el primer cultivo, el efecto residual de la RF permanece como una fracción del efecto residual del SFT a través del tiempo (León y Hammond, 1984).

Uso de la RF como Corrector

La RF es utilizada actualmente por agricultores como corrector en suelos ácidos y de baja disponibilidad de P. Para medir la efectividad de la RF, como corrector de suelo, el Proyecto condujo experimentos para comparar la RFH (1.0 t/ha), cal dolomítica (1.0 t/ha), y una mezcla de cal dolomítica y RF (500 kg/ha de cada una), en frijol en el área de Pescador, Cauca.

Los resultados de estos experimentos aparecen en el Cuadro 3. Estos resultados indican que la RFH utilizada sola o mezclada con la cal dolomítica produce rendimientos en frijol más altos que la cal dolomítica sola. Estos resultados fueron consistentes para las dos estaciones en las cuales los experimentos fueron llevados a cabo. En uno de los experimentos la mezcla de RF y cal produjo los rendimientos más altos, mientras que en los otros dos los produjo la RFH sola.

Evaluación Agronómica la RFPA

En algunos suelos la baja respuesta de algunos cultivos a la RF puede ser atribuida a su baja solubilidad, lo cual hace que el P no sea disponible para que lo asimilen los cultivos. Una forma común de aumentar la solubilidad de la RF es acidularla totalmente para producir SFS o SFT, o

acidularla parcialmente para producir RFPA. Aumentando la solubilidad de la roca, su eficiencia agronómica aumenta, lo cual resulta en rendimientos más altos de los cultivos. Los resultados presentados aquí corresponden a RF acidulada al 50% con ácido sulfúrico. Resultados obtenidos con los experimentos del Proyecto indican que las mezclas físicas de RF con SFT o DAF, simulando productos parcialmente acidulados, dan los mismos resultados que los productos parcialmente acidulados. Debido a esto, los resultados aquí presentados también son aplicables para estas mezclas.

Cuadro 3. Efectividad Agronómica Relativa de la RFH utilizada como corrector de suelo en frijol (Pescador, Cauca).

Corrector	Primer Cultivo		Segundo Cultivo	
	Rendimiento (kg/ha)	EAR (%)	Rendimiento (kg/ha)	EAR (%)
RFH	344	100	230	100
Cal Dolomítica	101	27	157	68
Cal+RFH	314	91	184	80
Control	10	-	0	-
RFH	311	100	341	100
Cal Dolomítica	85	3	99	-
Cal+RFH	205	55	300	78
Control	78	-	151	-
RFH	585	100	808	100
Cal Dolomítica	561	94	774	95
Cal+RFH	707	129	915	115
Control	159	-	109	-

A través de la investigación conducida en el Proyecto, se ha encontrado que las mejores prácticas de manejo para el uso

de RFFA son iguales a las del manejo del SFT. Esto quiere decir que el mejor tiempo y método de aplicación para el SFT son también los mejores para las RFFA.

El Cuadro 4 presenta resultados experimentales y la EAR obtenidos con rocas parcialmente aciduladas. Estos resultados muestran que la RFFA puede ser, en algunos casos, tan efectiva como el SFT, pero que su efectividad agronómica relativa a menudo varía entre el 65 y el 95%. Esto es cierto para una gran variedad de suelos, condiciones agroclimáticas y cultivos. En los Oxisoles ácidos de baja fertilidad y en los Ultisoles de los Llanos Orientales, las RFFAs utilizadas en pastos, arroz y sorgo fueron tan buenas como el SFT. En los suelos Andepts de Nariño, la RFFA puede dar rendimientos de papa y de maíz/frijol más altos que los del SFT. Por otro lado, en Cundinamarca y Boyacá en las áreas de papa, los rendimientos obtenidos con la RFFA pueden llegar a ser un 65% de aquellos obtenidos con el SFT.

Evaluación Económica de Fuentes de P

La evaluación económica se refiere a la estimación de los beneficios netos recibidos por el agricultor debido al uso de fertilizante. Dichos beneficios están definidos como la diferencia entre el aumento en la producción menos el costo del fertilizante utilizado. Para estimar el valor del aumento de la producción, son utilizados los precios de los cultivos recibidos por los agricultores, mientras que para estimar del costo del fertilizante, son utilizados los precios pagados por ellos. Los precios utilizados fueron: para SFT y RFFA \$200/kg de P, para RFH y RFP \$125/kg de P, arroz \$42/kg, yuca \$35/kg, maíz \$32/kg, papa \$20/kg, y frijol \$120/kg. Debido a que la RFFA es un producto no disponible en el mercado, su evaluación fue realizada asumiendo que el precio es igual al del SFT, por lo que su eficiencia económica está directamente relacionada con su efectividad agronómica relativa, tal como aparece en el Cuadro 5. Si en el futuro la RFFA estuviera disponible para los agricultores a precios más altos o más bajos que los utilizados en esta evaluación, su eficiencia económica relativa será también más alta o más baja.

Debido a que el retorno neto debido al uso de fertilizantes cambia a medida que cambian los precios de los fertilizantes y de los cultivos, fue calculada la relación valor/costo, que mide la relación entre el aumento en valor de la producción y el costo total del fertilizante. La relación valor/costo está menos sujeta a variaciones debidas a cambios en los precios, y no cambia en situaciones donde los precios de los cultivos y de los fertilizantes cambian al mismo ritmo. La relación valor/costo nos da una indicación de que tan seguro es invertir recursos en fertilizantes.

Cuadro 4. Efectividad Agronómica Relativa de la RFHPA y de la RFPPA* comparadas con el SFT en diferentes suelos y cultivos.

Fuente de P	Localización	Tipo de Suelo	Cultivo/Dosis (kg P/ha)	Rendimiento (kg/ha)	EAR (%)
SFT	M/vita, Boyacá	Andept	Papa	24300	100
RFHPA			150	20640	80
Control				5610	
SFT	Ipiales, Nariño	Andept	Papa ^a	24628	100
RFHPA			150	25914	113
Control				15003	
SFT	Ipiales, Nariño	Andept	Maiz/Frijol ^b	7315	100
RFHPA			60	7435	105
Control				4863	
SFT	Pescador, Cauca	Inceptisol	Frijol	1248	100
RFHPA			100	1151	88
Control				454	
SFT	Pescador, Cauca	Inceptisol	Maiz	1580	100
RFHPA			150	1448	92
Control				0	
SFT	V/cencia, Meta	Oxisol	Arroz riego	4793	100
RFHPA			25	4743	92
Control				4178	
SFT	El Caibe, Meta	Oxisol	Sorgo	2331	100
RFHPA			100	2336	105
RFPPA				2340	109
Control				2228	
SFT	Caldono, Cauca	Inceptisol	Yuca ^c	23232	100
RFHPA			82	20876	82
Control				10300	

*RFHPA = RF Huila parcialmente acidulada; RFPPA = RF Pesca parcialmente acidulada.

a. Promedio de 5 experimentos.

b. Promedio de 9 experimentos. Rendimiento expresando en maíz equivalentes.

c. Promedio de 3 experimentos.

Cuadro 5. Evaluación económica de diferentes fuentes de fósforo mediante la Relación Valor/Costo (RVC) y la Efectividad Económica Relativa (EER).

Fuente de P	Localización	Tipo de Suelo	Cultivo	Dosis (kg P/ha)	Rendimiento (kg/ha)	RVC	EER (%)
SFT	Tausa, C/marca	Andept	Papa	150	24033	15.3	100
RFH				0	-	-	0
Control					1066		
SFT	Ipiales, Mariño	Andept	Papa ^a	180	24628	5.3	100
RFHPA				180	25914	6.1	116
RFH				180	22321	6.5	79
Control					15003		
SFT	Motavita, Boyacá	Andept	Papa	150	24300	12.5	100
RFHPA				150	20640	10.0	79
Control					5610		
SFT	Pescador, Cauca	Inceptisol	Frijol ^b	104	841	4.4	100
RFHPA				92	738	4.4	86
RFH				39	142	2.3	5
Control					71		
SFT	Pescador, Cauca	Inceptisol	Maiz	150	1965	2.1	100
RFHPA				100	1428	2.3	78
RFH				0	-	-	0
Control					0		
SFT	Caldono, Cauca	Inceptisol	Yuca	82	23232	27.6	100
RFHPA				82	20876	22.6	81
RFH				82	12631	8.0	16
Control					10300		
SFT	V/cencio, Meta	Oxisol	Arroz riego ^b	29	4819	4.6	100
RFHPA				39	4819	3.5	91
RFH				32	4658	5.0	77
RFP				24	4650	6.6	80
Control					4178		
SFT	C/magua, Meta	Oxisol	Arroz seco ^b	40	4436	16.1	100
RFH				40	4458	26.6	101
Control					1172		

a. Promedio de 5 experimentos.

b. Promedio de 4 experimentos.

Para inducir a los agricultores a invertir en fertilizantes la relación valor/costo debe ser por lo menos dos; una relación valor/costo menor que dos indica que el uso de fertilizantes es de mucho riesgo para ser aceptable. La efectividad económica relativa (EER) mide la efectividad económica de la RFFA y de la RF en relación con la del SFT y se define como la relación del ingreso neto obtenido con la RFFA y con la RF y los retornos netos obtenidos con el SFT. Para la evaluación económica presentada aquí, la estimación de estos parámetros económicos fue efectuada a la dosis de aplicación la cual maximiza los retornos netos para cada producto ensayado.

La RF usada para aplicación directa tiene la EER más baja de todos los productos ensayados. La eficiencia económica relativa de la RF fue más alta en los suelos de los Llanos Orientales (Oxisoles) y en el Área de Nariño (Andepts). La eficiencia económica relativa más baja de la RF se obtuvo en los suelos de Cundinamarca y Boyacá (Andepts) y en los suelos de Pescador, Cauca (Andepts). En algunos de estos suelos no hubo la suficiente respuesta de los cultivos como para justificar la aplicación de RF.

Los resultados aquí presentados indican que la RFFA y la RF molida producen una mayor eficiencia económica relativa en los mismos tipos de suelos (Oxisoles) de los Llanos Orientales y los Andepts de Nariño. En los lugares donde las aplicaciones de la RFFA no fue muy efectiva, las de RF fueron menos efectivas.

El Cuadro 6 presenta los resultados de la evaluación económica de la RF Huila utilizada como corrector de suelo en tres experimentos conducidos durante dos cultivos consecutivos. La efectividad de la RF como corrector de suelo está determinada por la cantidad de carbonatos de calcio libre que ella tiene; debido a esto, los resultados discutidos aquí se aplican solamente a la roca de Huila, la cual tiene el mayor porcentaje de carbonatos de calcio de todas las rocas colombianas.

El Cuadro 6 indica que en los tres experimentos realizados, la RFH utilizada sola o mezclada con cal dolomítica, produjo aumentos de rendimiento y una efectividad económica relativa mayores que la cal dolomítica utilizada sola. De acuerdo a la relación valor/costo obtenida con estos experimentos se puede asegurar que, comparada con la cal dolomítica, el uso de RFH como corrector de suelo es una buena opción para los agricultores. Obviamente, los mayores aumentos de rendimiento obtenidos con la RFH fueron debidos en parte al contenido de P en la roca y en parte a su efecto calcador. Sin embargo, estos resultados son preliminares y es necesaria más investigación en esta área para identificar

mejor los suelos donde la roca puede ser usada efectivamente como un corrector, la mezcla apropiada de RFH y cal, y para determinar los aumentos de rendimiento debido al contenido de fósforo y al efecto del calcio de la roca.

Cuadro 6. Análisis económico mediante la Relación Valor/Costo (RVC) y la Efectividad Económica Relativa (EER) de la RFH utilizada como corrector de suelo en el cultivo de frijol en Pescador, Cauca.

	Rendimiento (kg/ha)		RVC ^a	EER (%)
	Primer cultivo	Segundo cultivo		
RFH	344	230	2.8	100
Cal Dolomítica	101	157	2.1	41
Cal+RFH	314	184	5.3	91
Control	10	0		
RFH	311	341	2.8	100
Cal Dolomítica	85	99	-	-
Cal+RFH	205	300	2.4	61
Control	78	151		
RFH	585	808	8.6	100
Cal Dolomítica	561	774	20.9	101
Cal+RFH	707	915	15.5	127
Control	159	109		

a. Los precios utilizados fueron: RFH \$12,000/ton, Cal Dolomítica \$5,000/ton, y frijol \$120/kg.

El segundo cultivo fue descontado a $i = 30\%$.

Uso Potencial de las RF

Esta sección presenta una descripción resumida de los suelos de Colombia, su contenido de P y la estimación del uso potencial de RF y de RFPA en diferentes regiones y cultivos

del país. Incluye estimativos de la efectividad agronómica relativa de su uso en diferentes cultivos y en zonas agroecológicamente homogéneas, e identifica algunos cultivos alimenticios importantes en los cuales estos productos pueden ser utilizados. También se incluyen algunos mapas que muestran la localización aproximada de las regiones donde la RF y la RFFA pudieran ser utilizadas efectivamente.

Suelos

Colombia es un país con un área total estimada de 114.175.000 hectáreas. Como se puede apreciar en el Cuadro 7 sólo 10.9 millones de hectáreas son aptas para la producción de cultivos anuales sin riego, y 3.5 millones de hectáreas pueden ser cultivadas con la ayuda de riego. El área agrícola del país (irrigada y que no necesita riego) llega a un total de 14.4 millones de hectáreas, o sea solamente el 12.7% del área total del país. Del área restante, 19.2 millones de hectáreas, ó 16.8% del total, son aptas para producción extensiva y semi-intensiva de productos agropecuarios, mientras que 67.1 millones de hectáreas o sea el 58.7% del total están consideradas sin posibilidades de producción agrícola.

Los suelos de Colombia han sido clasificados de acuerdo con el sistema de clasificación de los Estados Unidos (Cortéz, et al., 1982). El país presenta una gran variedad de suelos pero como aparece en el Cuadro 8 está dominado por los Inceptisoles, Entisoles, Oxisoles y Ultisoles. Se estima que el 91.6% de los suelos en el país pertenecen a alguno de estos ordenes de suelos. De estos cuatro ordenes, los Inceptisoles y los Entisoles son los predominantes en las áreas actualmente cultivadas del país. Los Oxisoles y Ultisoles son más comunes en la región de los Llanos Orientales, una área que está ganando importancia debido a que ofrece el mejor y más grande potencial para expansión de la producción agrícola comercial. El área de los Llanos Orientales está relativamente cerca a importantes áreas de mercado, bajo condiciones climáticas las cuales favorecen la agricultura y formada mayormente por áreas planas fácilmente mecanizables.

Fertilidad

La fertilidad natural de los suelos colombianos varía grandemente de una región a otra. En general, el contenido de P disponible en los suelos colombianos se considera como bajo, y el uso de fertilizantes fosfatados en la producción agrícola comercial es recomendado. Excepciones a esto son áreas de alta fertilidad tales como la Sabana de Bogotá, ciertas áreas en la Costa Atlántica, el Valle del Río Cauca y el Valle del Río Zulia.

Cuadro 7. Clasificación de Tierras en Colombia (Cortés, 1985).

Tipo de Tierras	Area	
	10 ³ ha	%
<u>Areas Agrícolas</u>		
Agricultura de Riego	3,499	3.1
Agricultura de Secano		
Tierras Planas--Cultivos Transitorios	2,693	2.4
Tierras de Ladera--Cultivos Transitorios	190	.2
Cultivos Permanentes	7,981	7.0
Sub-Total	14,363	12.7
<u>Areas Ganaderas</u>		
Producción Ganadera Extensiva y Semi-Intensiva. Cultivos Transitorios y Semi-Permanentes	8,343	7.3
Ganadería Extensiva	4,942	4.3
Ganadería muy Extensiva	5,966	5.2
Sub-Total	19,251	16.8
<u>Areas Forestales</u>		
Con Posibilidad Agrícola	11,208	9.8
Sin Posibilidad Agrícola	67,093	58.7
Sub-Total	78,301	68.5
<u>Otras Areas</u>		
Ciénagas, Pantanos, Ríos y Zonas Urbanas	2,259	2.0
Total	114,175	100.0

Cuadro 8. Distribución de los suelos en Colombia. (Estimado de: "Mapa de Suelos de Colombia", 1982. Instituto Geográfico Agustín Codazzi).

Orden	Area	
	10 ⁴ ha	%
Entisoles	23.5	21.0
Inceptisoles	15.9	14.2
Entisoles/Inceptisoles	18.6	16.6
Oxisoles	12.8	10.7
Oxisoles/Inceptisoles	18.6	16.6
Oxisoles/Ultisoles	6.2	5.5
Oxisoles/Entisoles	5.5	4.9
Ultisoles/Inceptisoles	3.5	3.1
Total	104.6	91.6
Area Total del País	114.2	100.0

El Cuadro 9 presenta un resumen de los resultados de aproximadamente 100,000 muestras de suelo analizadas por el ICA entre 1965 y 1978 (Marín, et al., 1982). Este cuadro presenta la distribución porcentual de las muestras de suelo por región natural y niveles de disponibilidad de P. Como se puede ver, en seis de las 10 regiones enumeradas más del 50% de las muestras de suelo fueron consideradas como bajas en P. La Costa Atlántica y la Guajira fueron las únicas dos regiones donde más del 50% de las muestras fueron clasificadas con una alta disponibilidad de P.

El Cuadro 10 presenta la distribución porcentual de muestras de suelo para cultivos importantes y por departamento de acuerdo a los requerimientos específicos de los cultivos y a la disponibilidad de P en el suelo. Este cuadro también incluye un estimado (preliminar) del área sembrada con estos cultivos durante 1986. Como este cuadro lo muestra, para muchos de estos cultivos y en varios departamentos los

suelos bajos en P son dominantes (más del 50%) y en algunos casos, los suelos con bajo P llegan a ser más del 70% de las muestras. Parece ser que la mayoría de los suelos donde la papa, la yuca, el frijol y el maíz son cultivados tienen una baja disponibilidad de P. Debido a esto, para una producción agrícola comercial sostenida de estos cultivos en estas áreas, el uso de fertilizantes fosfatados es indispensable.

Cuadro 9. Distribución de muestras de suelo por región natural y niveles de disponibilidad de fósforo (Marín et al., 1982).

Región Natural	Disponibilidad de fósforo		
	Baja (%)	Media (%)	Alta (%)
Región Andina	68	14	18
Sabana de Bogotá	45	25	30
Valle de Magdalena (alto)	46	17	37
Valle de Magdalena (bajo)	59	16	25
Valle de Cauca	52	21	27
La Costa Pacífica	80	11	9
La Costa Atlántica	27	13	60
Guajira	25	15	60
Orinoquía	69	15	16
Amazonia	77	11	12

Uso potencial

El Cuadro 11 presenta la eficiencia agronómica relativa estimada para la RF y para la RFPA para diferentes cultivos y en las regiones agroecológicas homogéneas de Colombia. Este cuadro incluye todas aquellas áreas con potencial agrícola para cultivos alimenticios, industriales y pastos, en secano o bajo riego. Las zonas agroecológicas homogéneas fueron determinadas considerando los siguientes factores:

1. Clima: altitud, temperatura y lluvia.

Cuadro 10. Distribución de muestras de suelo por cultivo, departamento y nivel de disponibilidad de fósforo. (Marín et al., 1982).

Cultivo	Departamento	Área cultivada ^a (10 ³ ha)	Disponibilidad de P		
			Baja (%)	Media (%)	Alta (%)
Arroz	Meta	67.5	65	22	13
	Tolima	75.3	38	26	36
	Huila	31.8	36	15	49
Maíz	Antioquia	105.2	70	16	44
	Cundinamarca	70.8	59	14	27
	Boyacá	42.0	44	18	38
	Nariño	39.9	66	17	17
Frijol	Antioquia	31.1	83	13	4
	Boyacá	42.0	47	16	37
	Cauca	2.2	81	9	10
	Valle del Cauca	5.2	55	23	22
	Huila	30.0	56	29	15
Papa	Boyacá	39.0	74	7	19
	Cundinamarca	53.0	66	10	24
	Nariño	18.0	59	19	22
	Antioquia	15.8	84	11	5
Yuca	Cauca	2.8	96	3	1
	Meta	4.5	83	7	10
	N de Santander	7.6	55	18	27
	Valle del Cauca	3.0	70	14	16
Caña de azúcar (panela)	Boyacá	18.1	74	15	11
	Cundinamarca	40.5	43	26	31
	Antioquia	37.7	84	9	7
	Nariño	20.0	70	12	18
	Santander	25.4	56	24	20
Pastos	Antioquia		77	14	9
	Boyacá		61	15	24
	Cundinamarca		49	25	26
	Meta		75	8	17
	Valle del Cauca		69	16	15

a. Estimativo preliminar 1986.

Cuadro 11. Eficiencia Agronómica Relativa estimada para la RF y la RFPA para diferentes cultivos en regiones agro-ecológicas homogéneas de Colombia.

Región	Área (ha)	Cultivo	EAR (%)	
			RF	RFPA
<u>0-1000 mm, Temperatura >24°C, Lluvia 500 a 2000 mm/año</u>				
Cg	114,500	Pastos	95	100
Cj	3,171,925	Arroz	55	85
		Maíz/Sorgo	25	85
Cp	3,139,350	Pastos	95	100
		Yuca	85	95
		Maní	85	95
		Sorgo	55	90
Cq	453,875	Arroz	85	95
Cr	681,600	Pastos	95	100
Cs	5,038,400	Pastos	85	95
<u>0-1000 mm, Temperatura >24°C, Lluvia 2000 a 8000 mm/año</u>				
Kd	1,433,750	Arroz	65	90
		Yuca	65	85
		Maíz/Sorgo	45	85
Ke	238,500	Pastos	85	100
		Yuca	85	95
		Maíz	45	85
Kf	1,089,500	Pastos	85	95
		Arroz	85	95
		Maíz	55	85
Kk	915,175	Pastos	85	100
Kr	1,742,625	Maíz	45	85

(Continúa)

Cuadro 11. Eficiencia Agronómica Relativa Estimada para la RF y la RFFA para diferentes cultivos en regiones agro-ecológicas homogéneas de Colombia. (Continuación).

Región	Área (ha)	Cultivo	EAR (%)	
			RF	RFFA
<u>1000-2000 mm, Temperatura 18°-24°C, Lluvia 500 a 1000 mm/año</u>				
Ma*	76,325			
<u>1000-2000 mm, Temperatura 18°-24°C, Lluvia 1000 a 4000 mm/año</u>				
Me	409,150	Frijol	25	85
		Yuca	65	90
		Caña de Azúcar	65	90
Mf	1,129,175	Caña de Azúcar	65	90
		Pastos	75	95
<u>2000-3000 mm, Temperatura 12°-18°C, Lluvia 500 a 1000 mm/año</u>				
Fa	221,750	Papa	20	85
		Trigo	20	85
		Maiz/Frijol	80	100
Fc	132,150	Pastos	65	90
Fg	38,625	Pastos	75	95
		Papa	20	95
Fh	188,750	Papa	15	90
		Frijol	5	90
		Maiz	5	90
Fk	699,125	Pastos	55	90
<u>3000-4000 mm, Temperatura 6°-18°C, Lluvia 500 a 2000 mm/año</u>				
Pa	45,500	Papa	75	95
<u>Área Total</u>	<u>20,959,750</u>			

a. Esta región incluye suelos con alta fertilidad donde la fertilización con RF o con RFFA no es recomendable.

2. Geomorfología: pendiente y relieve.
3. Material parental: sedimentario, ígneo, metamórfico, y
4. Suelos: grado de evolución, profundidad efectiva, drenaje, erosión y fertilidad.

Las regiones homogéneas son identificadas con códigos de letras, descripciones de las cuales pueden ser encontradas en la publicación original (Cortéz, 1985).

La efectividad agronómica relativa para la RF y para la RFFA ha sido estimada para cultivos de la región, o para aquellos cultivos recomendados en esas regiones. Este estudio no consideró cultivos industriales tales como café, tabaco, caña de azúcar y algodón.

Como se puede ver de las estimaciones de efectividad agronómica relativa presentadas en el Cuadro 11, una gran variación puede ser esperada del comportamiento de la RF y de la RFFA en diferentes tipos de regiones agroecológicas. Por ejemplo en las regiones Caño y Cr, los pastos, la efectividad agronómica relativa de RF se estima en 95%, mientras que en regiones tales como la Fa con papa y Fh con maíz y frijol se estima que la efectividad agronómica relativa de la RF no exceda al 20%. Obviamente, en regiones con una alta efectividad agronómica relativa para RF es ventajoso utilizarla, mientras que en regiones donde ésta es baja no es recomendable.

Con respecto al comportamiento de la RFFA, puede notarse que su efectividad agronómica relativa es más alta que la de la RF, y que para algunos cultivos y en algunas regiones agroecológicas puede ser igual al 100%. A pesar de que resultados experimentales obtenidos por el Proyecto indican que la RFFA, en ciertos casos puede tener una efectividad agronómica relativa mayor que el 100%, para áreas extensas tales como las presentadas en el Cuadro 11, es improbable que la RFFA se comporte mejor que el SFT u otra fuente soluble de P. La efectividad agronómica relativa de la RFFA se estima que sea entre 85 y 100% en las zonas agroecológicas homogéneas seleccionadas de Colombia, lo que indica que su uso a través del país es adecuada.

La Figura 1 muestra las áreas generales aproximadas del país donde la RF puede ser aplicada a pastos con una efectividad agronómica relativa del 85 al 100%, y del 85 al 90% en arroz. La Figura 2 presenta información similar para la RFFA, con eficiencias agronómicas relativas estimadas de: en pastos, 95-100%, en arroz, 90-95%; en sorgo y maíz, 85-90%, en papa, 85-100%, en frijol, 85-95% y caña de azúcar para panela, 90-95%.

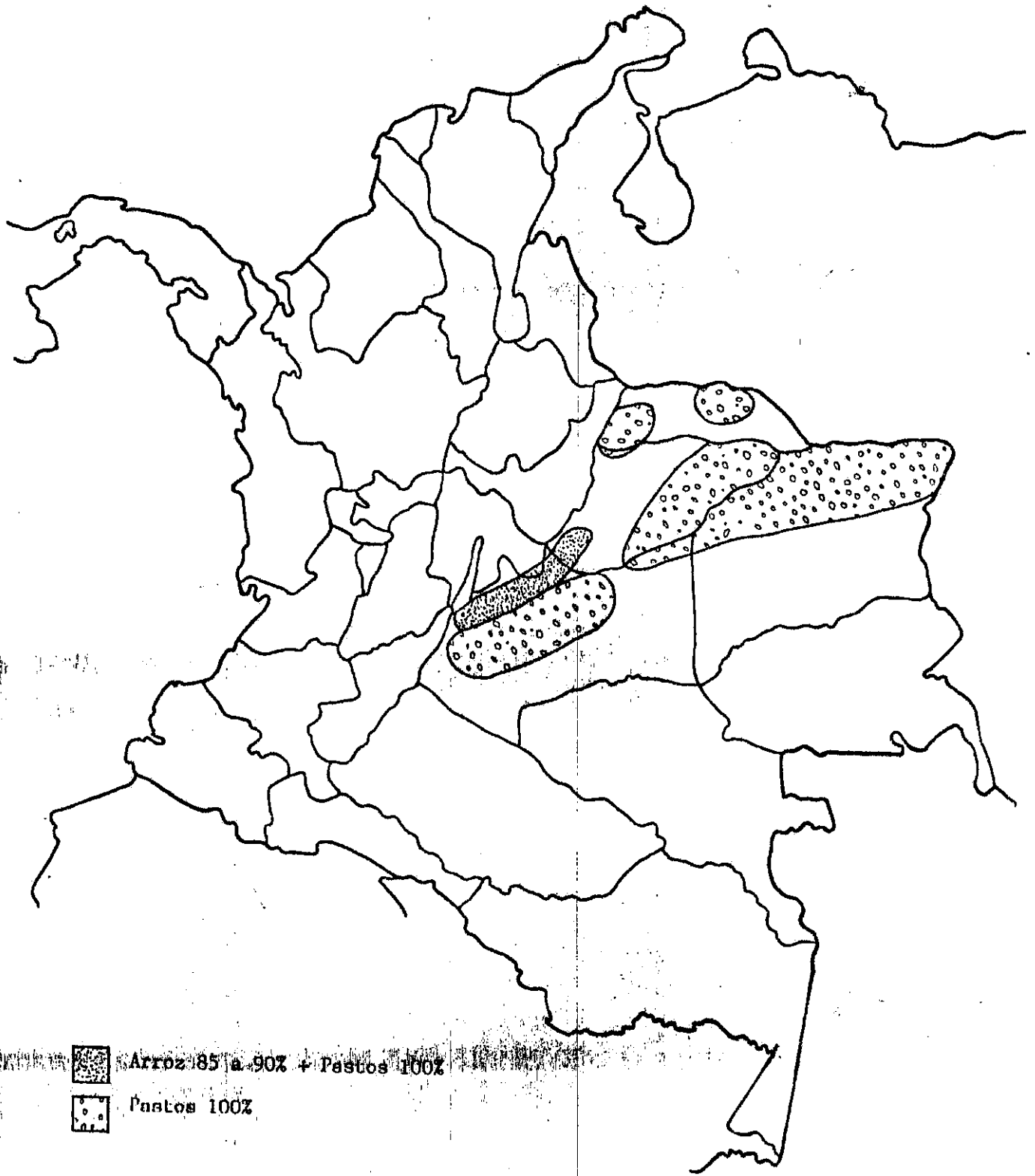


Figura 1. Areas potenciales, cultivos y EAR para roca fosf6rica.

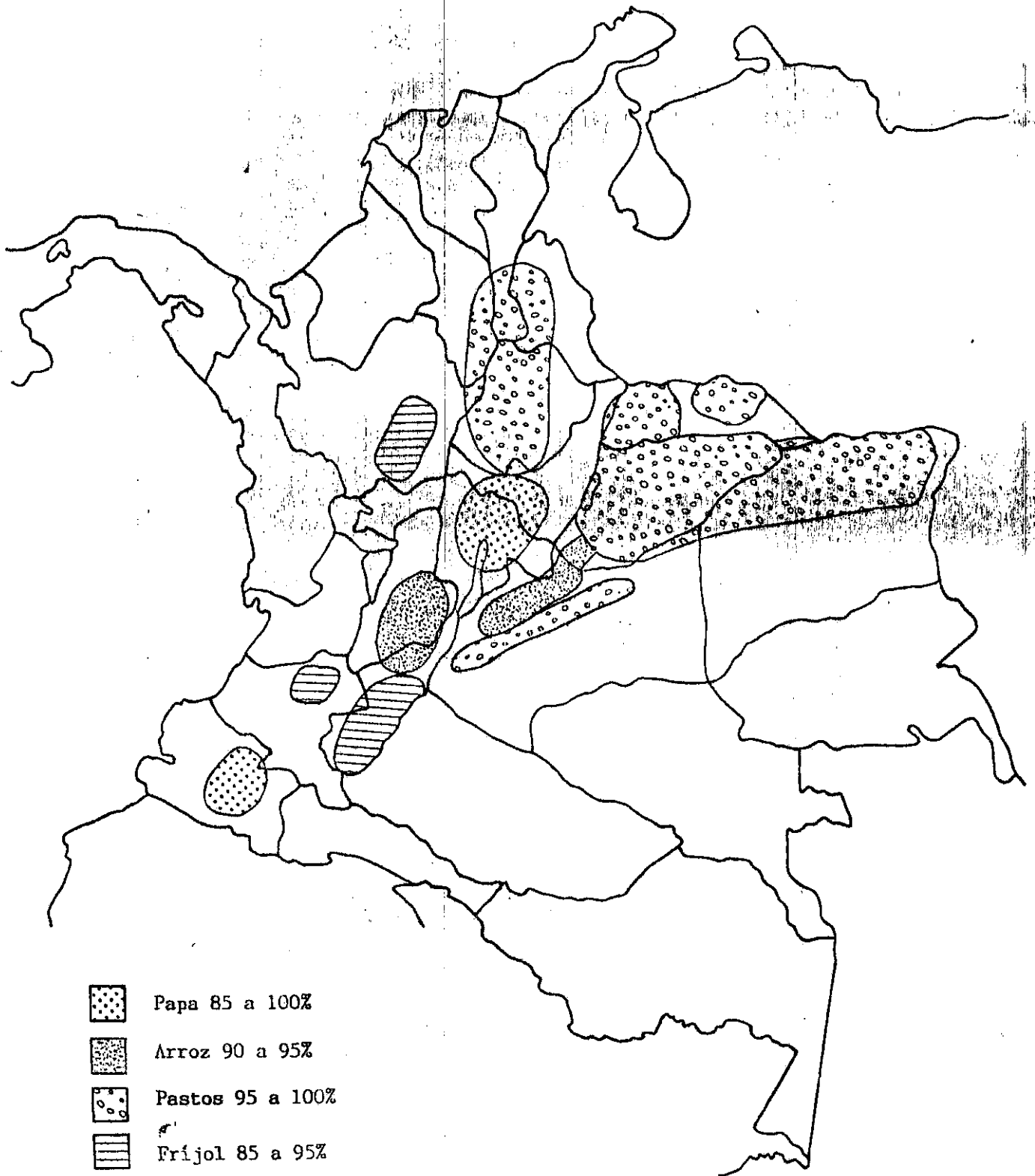


Figura 2. Areas potenciales, cultivos y EAR para RFPA.

De este análisis se puede concluir que la RFFA puede ser utilizada efectivamente como fuente de P en el país en una gran variedad de cultivos y en las principales regiones agrícolas. Por otro lado, la RF puede ser utilizada como fuente de P sólo en ciertas áreas del país, y en algunos cultivos donde su efectividad ha sido comprobada. La RF puede también ser utilizada como corrector de suelo en grandes áreas del país que presentan suelos ácidos y de baja fertilidad.

Para determinar el potencial (uso posible o recomendado) de la RF doméstica para suministrar las necesidades de fósforo en los cultivos en el país, se puede afirmar que a través de la utilización de RF molida para aplicación directa y de RFFA, la mayoría de las necesidades de P del país pueden ser abastecidas. Sin embargo, como estos dos productos tienen en general una EAR y una EER más bajas que el SFT, sus precios deberían ser también más bajos que el del SFT, para inducir a los agricultores a que los utilicen.

El Cuadro 12 presenta una estimación del potencial de P utilizado por diferentes cultivos en diferentes áreas del país. El uso potencial de P fue estimado multiplicando las dosis recomendadas por cultivo y por región y el contenido de P del suelo por las áreas con cada cultivo. Las áreas con contenido de P bajo y medio fueron estimadas utilizando los porcentajes presentados en el Cuadro 9. Los cultivos y áreas incluidos en este cuadro utilizaron el 55% del P en el país durante 1985.

Como el Cuadro 12 muestra, se estima que el uso potencial de fósforo en estos cultivos es de 30,721 toneladas de P, (70,351 toneladas de P_2O_5) utilizando datos de áreas de 1986. Se estima que la mayor parte de estas necesidades de P pueden ser suministradas por la RFFA producida con reservas domésticas. También la RF para aplicación directa puede ser utilizada para proveer las necesidades de fosfatos en los suelos del Meta (arroz, maíz y yuca), Nariño (papa), y en todos los suelos con bajo contenido de P que son cultivados con caña de azúcar para panela. Sin incluir pastos y otros cultivos donde se estima que la RF puede ser utilizada (por ejemplo palma africana, y sorgo), la RF puede ser utilizada para suministrar 8,420 toneladas de P (19,281 toneladas de P_2O_5). Esto es equivalente aproximadamente a 87,600 toneladas de RF con un contenido promedio de P_2O_5 del 22%.

Adicionalmente, como se ha mostrado en este reporte, la RF puede ser utilizada efectivamente como corrector en suelos ácidos, donde la respuesta agronómica y los beneficios económicos obtenidos del uso de la RF y de la RF mezclada con cal dolomítica, exceden aquellos obtenidos por el uso de la cal dolomítica sola. Hay varios millones de hectáreas en el país con suelos ácidos donde la RF puede ser utilizada efectivamente como un encalador de suelo.

Cuadro 12. Uso potencial de fósforo en varios cultivos.

Potencial de cultivo	Departamento	Recomendación (kg P/ha)		Área (10 ³ ha)		P
		Baja	Media	Baja	Medio	
Arroz	Meta	33	22	43.9*	14.9	1777
	Tolima	18	9	28.6	19.6	691
	Huila	18	9	11.4	4.8	248
Maiz	Antioquia	44	22	73.6	16.8	3608
	Cundinamarca	22	11	41.8	9.9	1029
	Boyacá	22	11	18.5	7.6	491
	Nariño	44	22	26.3	6.8	1307
	Meta	33	22	7.6*	2.1	297
Frijol	Antioquia	33	22	25.8	4.0	939
	Boyacá	33	22	19.7	6.7	778
	Cauca	33	22	1.8	.2	64
	Valle del Cauca	22	11	2.9	1.2	77
	Huila	22	11	16.8	8.7	465
Papa	Boyacá	130	110	28.8	2.7	4054
	Cundinamarca	130	110	35.0	5.3	5133
	Antioquia	130	87	10.6	3.4	1674
	Nariño	130	87	13.3*	1.7	1877
Yuca	Cauca	44	22	2.7	.1	121
	Meta	44	22	3.7*	.3	169
	N de Santander	44	22	4.2	1.4	216
	Valle del Cauca	33	22	2.1	.4	78
Caña de Azúcar	Boyacá	44	22	13.3*	2.7	645
	Cundinamarca	44	22	17.4*	10.5	997
	Antioquia	66	33	31.7*	3.4	2204
	Nariño	66	33	14.0*	2.4	1003
	Santander	44	22	14.2*	6.1	759
Total						30721

a. Áreas y cultivos donde el P para aplicación directa puede ser utilizada.

REFERENCIAS

- León, L.A. y L.L. Hammond. 1984. Efectividad Agronómica de las Rocas Fosfóricas del Trópico Latinoamericano. En La Roca Fosfórica Fertilizante de Bajo Costo. Grupo Latinoamericano de Investigadores en Roca Fosfórica (GLIRF), Cochabamba, Bolivia.
- Cortéz, L.A. et al. 1982. Mapa de Suelos de Colombia, Ministerio de Hacienda y Crédito Público, Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Bogotá, Colombia.
- Cortéz, L.A. 1985. Zonificación Ecológica de Colombia, Ministerio de Hacienda y Crédito Público, IGAC, Bogotá, Colombia.
- Hughes, J.C. y R.J. Gilks. 1986. The Effect of Rock Phosphate Properties on the Extent of Fertilizer Dissolution in Soils, Australian Journal of Soil Research, 24: 209-217.
- IFDC/CIAT Phosphate Project. 1986. Annual Report 1985, Cali, Colombia (Mimeo).
- Marín, G.; J. Navas y J. Henao. 1982. La Fertilidad de los Suelos Colombianos y las Necesidades de Fertilizantes, Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), Tibaitatá, Colombia.