

# Utilización de las rocas fosfóricas para una agricultura sostenible



# Utilización de las rocas fosfóricas para una agricultura sostenible

BOLETÍN FAO  
FERTILIZANTES  
Y NUTRICIÓN  
VEGETAL

13

Edición técnica:

**F. Zapata**

División Mixta FAO/OIEA de Técnicas Nucleares  
en la Agricultura y la Alimentación  
Viena, Austria

**R.N. Roy**

Dirección de Fomento de Tierras y Aguas  
FAO, Roma, Italia

Publicación conjunta de la  
Organización de las Naciones Unidas  
para la Agricultura y la Alimentación  
y del Organismo Internacional de Energía Atómica

Las denominaciones empleadas en este producto informativo y la forma en que aparecen presentados los datos que contiene no implican, de parte de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), juicio alguno sobre la condición jurídica o nivel de desarrollo de países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni respecto de la delimitación de sus fronteras o límites. La mención de empresas o productos de fabricantes en particular, estén o no patentados, no implica que la FAO los apruebe o recomiende de preferencia a otros de naturaleza similar que no se mencionan.

Las opiniones expresadas en este producto informativo son las de su(s) autor(es), y no reflejan necesariamente los puntos de vista de la Organización de la FAO.

ISBN 978-92-5-305030-7

Todos los derechos reservados. Se autoriza la reproducción y difusión de material contenido en este producto informativo para fines educativos u otros fines no comerciales sin previa autorización escrita de los titulares de los derechos de autor, siempre que se especifique claramente la fuente. Se prohíbe la reproducción del material contenido en este producto informativo para reventa u otros fines comerciales sin previa autorización escrita de los titulares de los derechos de autor. Las peticiones para obtener tal autorización deberán dirigirse al Jefe de la Subdivisión de Políticas y Apoyo en Materia de Publicación Electrónica de la División de Comunicación de la FAO  
Viale delle Terme di Caracalla, 00153 Roma, Italia  
o por correo electrónico a:  
[copyright@fao.org](mailto:copyright@fao.org)

© FAO 2007

# Índice

<b>Prólogo</b>	<b>xi</b>
<b>Autores</b>	<b>xiv</b>
<b>Lista de abreviaciones y símbolos</b>	<b>xv</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>xviii</b>
<b>Resumen</b>	<b>xix</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
El fósforo en el sistema suelo-planta	1
La necesidad de un desarrollo sostenible	2
La limitación de fósforo en los suelos ácidos tropicales	3
Uso de las rocas fosfóricas en la industria y la agricultura	3
Las rocas fosfóricas como materia prima para la fabricación de fertilizantes fosfatados	4
La roca fosfórica para aplicación directa en la agricultura	5
Reseña histórica sobre el uso de las rocas fosfóricas en la agricultura	6
El boletín	9
<b>2. Depósitos mundiales de fosfatos</b>	<b>11</b>
La producción mundial de roca fosfórica	11
Reservas y recursos mundiales de roca fosfórica	13
Tendencias futuras en la producción mundial de roca fosfórica	15
<b>3. Caracterización de las rocas fosfóricas</b>	<b>17</b>
Mineralogía de las rocas fosfóricas	17
Apatitas sedimentarias	17
Apatitas ígneas	19
Otros minerales en las rocas fosfóricas	19
Pruebas de solubilidad de las rocas fosfóricas	20
Solubilidad de la apatita	20
Clasificación de las rocas fosfóricas basada en la solubilidad	23
Métodos de caracterización	24
<b>4. Evaluación de las rocas fosfóricas para aplicación directa</b>	<b>27</b>
Pruebas de solubilidad de las rocas fosfóricas	28
Mediciones de la solubilidad utilizando técnicas químicas convencionales	28
Cinética de la disolución de la roca fosfórica a largo plazo	30
Escalas de reactividad de la roca fosfórica y la respuesta de rendimiento de los cultivos	31
Medición del P intercambiable de la roca fosfórica con las técnicas radioisotópicas	33
Reacciones entre las rocas fosfóricas y el suelo	34

Incubación en el suelo	34
Efecto de encalado de las rocas fosfóricas	35
Ensayos en invernadero	36
Comparación de las rocas fosfóricas con los fertilizantes estándar	38
Efecto del tiempo	39
Relación entre la solubilidad de la roca fosfórica y la absorción de P por el cultivo	40
Evaluación en el campo	40
<b>5. Factores que afectan la eficiencia agronómica de las rocas fosfóricas, incluyendo un análisis de estudios de caso</b>	<b>43</b>
Factores que afectan la efectividad agronómica de las rocas fosfóricas	43
Reactividad de las rocas fosfóricas	43
Propiedades del suelo	45
Las condiciones climáticas	47
Especies cultivadas	48
Las prácticas de manejo	48
Estudios de caso	50
Malí	50
Madagascar	51
India	52
Indonesia	55
Nueva Zelandia	57
América Latina	58
Venezuela	58
Brasil	60
<b>6. Análisis del suelo para la aplicación de roca fosfórica</b>	<b>63</b>
La reacción del fósforo en el suelo y los métodos de análisis	63
Métodos de análisis de suelo convencionales	65
El método Bray I	65
Los métodos Bray II y Mehlich I	67
El método Olsen	68
Métodos de análisis de suelo recientemente desarrollados	69
Método de las cintas de papel impregnadas en óxido de hierro	69
Método de mezcla de resinas de intercambio aniónico y catiónico	71
Método cinético de intercambio del isótopo <sup>32</sup> P	72
<b>7. Sistemas de apoyo a la toma de decisiones para el uso de las rocas fosfóricas</b>	<b>75</b>
Necesidad de un sistema de apoyo a la toma de decisiones para las rocas fosfóricas	75
Base conceptual para construir un sistema de apoyo a la toma de decisiones para las rocas fosfóricas	76
Diferentes tipos de sistemas de apoyo a la toma de decisiones para predecir el comportamiento de una roca fosfórica	77
Modelos mecanicistas	77
La combinación de modelos determinados mecanicistas y empíricos	77

Los sistemas «experto»	79
Requerimientos para un sistema global de apoyo a la toma de decisiones para la utilización de la roca fosfórica	80
Creación de un banco de datos sobre la reactividad de las rocas fosfóricas	80
Creación de un banco de datos de suelos para la utilización de la roca fosfórica	81
Otros requerimientos	81
Futuro desarrollo	82
<b>8. Los nutrientes secundarios, los micronutrientes, el efecto del encalado y los elementos peligrosos asociados con la utilización de las rocas fosfóricas</b>	<b>83</b>
Los nutrientes secundarios en las rocas fosfóricas	83
Los micronutrientes en las rocas fosfóricas	85
Efecto del encalado asociado al uso de las rocas fosfóricas	85
Los elementos químicos peligrosos en las rocas fosfóricas	88
<b>9. Técnicas para mejorar la eficiencia agronómica de las rocas fosfóricas</b>	<b>91</b>
Métodos biológicos	91
Los fosfocompostes	91
La inoculación de plántulas con endomicorrizas	94
Uso de las ectomicorrizas	96
Uso de los microorganismos solubilizadores de fosfatos	96
Utilización de los genotipos de las plantas	97
Métodos químicos	98
Acidulación parcial de la roca fosfórica	98
Métodos físicos	101
Compactación de la roca fosfórica con fertilizantes fosfatados solubles en agua	101
Mezclas en seco de la roca fosfórica con fertilizantes fosfatados solubles en agua	102
Mezclas de roca fosfórica y azufre elemental	103
<b>10. Factores económicos que influyen la adopción y la utilización de las rocas fosfóricas</b>	<b>105</b>
Adopción y uso posible de rocas fosfóricas por los usuarios	106
Costos de producción, transporte y distribución	109
Consideraciones económicas y políticas para apoyar la adopción de la roca fosfórica	110
Políticas de precio	112
Políticas de organización	112
Mercados de los productos agrícolas	113
Protección contra los riesgos	113
Políticas de investigación y de extensión	113
Estudios de caso sobre la explotación y utilización de la roca fosfórica	114
Comercialización de rocas fosfóricas locales para aplicación directa	117
América Latina	117
Asia	118
África subsahariana	118

---

Criterios económicos para la adopción y uso de la roca fosfórica – estudio de caso en Venezuela	119
Evaluación agronómica y mercado interno potencial	120
Estudio económico de la producción de roca fosfórica parcialmente acidulada	120
Prueba de evaluación en planta piloto	122
Calidad de la roca fosfórica parcialmente acidulada	122
La planta de roca fosfórica parcialmente acidulada en Morón	123
Materias primas y productos	123
<b>11. Legislación y control de calidad de las rocas fosfóricas para la aplicación directa</b>	<b>125</b>
Legislación actual sobre las rocas fosfóricas para aplicación directa	125
Aspectos relacionados	126
Contenido de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> total de la roca fosfórica	126
Solubilidad de la roca fosfórica	127
Expresión de la solubilidad de la roca fosfórica	127
Efecto de los carbonatos libres	128
Efecto del tamaño de partículas	129
Directivas para la legislación sobre la roca fosfórica para aplicación directa	130
<b>12. Epílogo</b>	<b>133</b>
<b>Referencias</b>	<b>135</b>

# Lista de cuadros

1.	Producción mundial de roca fosfórica, 1999	12
2.	Consumo mundial de roca fosfórica para aplicación directa	12
3.	Reservas mundiales de roca fosfórica y reservas de base (en 1 000 toneladas)	13
4.	Recursos económicos mundiales identificados de fosfatos concentrados (millones de toneladas)	14
5.	Datos de solubilidad en muestras de rocas fosfóricas seleccionadas	21
6.	Clasificación de las rocas fosfóricas para la aplicación directa según su solubilidad y respuesta inicial esperada	23
7.	Sistema de clasificación de algunas rocas fosfóricas de América del Sur según su solubilidad y eficiencia agronómica relativa	23
8.	Análisis químico y solubilidad en reactivos convencionales de rocas fosfóricas africanas seleccionadas	28
9.	Fósforo (P) soluble en citrato de la roca fosfórica de Carolina del Norte en función del tamaño de las partículas	30
10.	Coeficientes de correlación entre las escalas de reactividad de siete rocas fosfóricas y los rendimientos de los cultivos	32
11.	Variaciones espaciales en muestras de rocas fosfóricas dentro del mismo depósito	33
12.	Cinética de intercambio isotópico y solubilidad en el agua de las rocas fosfóricas	34
13.	Efectos de la incubación de las rocas fosfóricas sobre las características de un oxisol de Njole, Gabón	35
14.	Resultados de un experimento en invernadero con las rocas fosfóricas africanas seleccionadas	37
15.	Coeficientes EAR estimados en base a los valores L y al P absorbido. Experimento en invernadero.	39
16.	Variaciones temporales de los coeficientes de eficiencia agronómica relativa para las rocas fosfóricas aplicadas a un andosol de Madagascar	39
17.	Influencia del contenido de agua del suelo sobre la absorción de fósforo de las rocas fosfóricas en un oxisol de Madagascar	40
18.	Coeficientes de correlación entre la absorción de fósforo y las pruebas de solubilidad	40
19.	Rendimientos de los cultivos y eficiencia agronómica relativa estimados para los resultados de los experimentos de campo en Burkina Faso	41
20.	Rendimientos promedio de mijo, maní, sorgo, algodón y maíz obtenidos con la roca fosfórica de Tilemsi y el superfosfato, en Malí, 1982-1987	51
21.	Rendimientos de arroz y maíz obtenidos con la roca fosfórica de Mussoorie, el superfosfato simple y una mezcla 1:1 de roca fosfórica de Mussoorie y superfosfato simple	54
22.	Beneficios netos para los fertilizantes fosfatados aplicados a mijo africano y maíz y de su efecto residual evaluado con frijol mungo	55
23.	Efectividad agronómica relativa (EAR) de las rocas fosfóricas aplicadas a los cultivos en un Ultisol (Tepic Hapludult), Pelaihari, Kalimantan	56



---

24. Comparación entre una pastura renovada utilizando el tratamiento «roca fosfórica parcialmente acidulada-urea- <i>Stylosanthes capitata</i> » y una pastura tradicional degradada. Estado Monagas, Venezuela	59
25. Índices de eficiencia agronómica de los fertilizantes fosfatados en un oxisol arcilloso de Brasil central, estimados en base a los datos de absorción de fósforo durante cinco años con cultivos anuales, seguidos de tres años con la gramínea <i>Andropogon</i> sp.	60
26. Eficiencia Agronómica Relativa (EAR) de diversas rocas fosfóricas como fuente de calcio para el cultivo del maíz en comparación con el $\text{CaCO}_3$	85
27. Análisis químico de elementos potencialmente peligrosos en rocas fosfóricas sedimentarias	89
28. Contenido de elementos nutritivos en algunos residuos orgánicos y en compostes (en base a materia seca, excepto para la orina)	92
29. Efecto de las fuentes fosfatadas sobre el rendimiento de las leguminosas frijol mungo y guar	94
30. Matriz de los costos y beneficios asociados a las inversiones en rocas fosfóricas	115
31. Distribución de los beneficios para estrategias seleccionadas de fertilización	116
32. Rocas fosfóricas parcialmente aciduladas obtenidas de diversos depósitos de Venezuela	120
33. Capacidad actual de producción de $\text{P}_2\text{O}_5$ en el Complejo Morón	121
34. Resultados de la evaluación en la planta piloto	123
35. $\text{P}_2\text{O}_5$ total, $\text{P}_2\text{O}_5$ soluble en ácido cítrico neutro y relación $\text{CO}_3/\text{PO}_4$ de la apatita en varias rocas fosfóricas	127
36. Solubilidad en citrato de amonio neutro de las mezclas de roca fosfórica de Carolina del Norte con arena	128
37. Solubilidad en citrato de amonio neutro de las rocas fosfóricas con diversos contenidos de $\text{P}_2\text{O}_5$ total	128
38. Solubilidad de rocas fosfóricas medida por diversos métodos químicos de extracción	129
39. Solubilidad de rocas fosfóricas molidas y no molidas	130

## Lista de figuras

1. Depósitos económicos y potencialmente económicos de fosfatos en el mundo	13
2. Historia del descubrimiento de los recursos mundiales de fosfatos	15
3. Francolitas con exceso de fluor, correlación entre las moles de $\text{CO}_3^{-2}$ y las de $\text{PO}_4^{-3}$ en peso de la fórmula	18
4. Francolitas con exceso de fluor, variación entre el valor del parámetro cristalográfico $a$ de la celda unitaria y el aumento de $\text{CO}_3^{-2}$ en la sustitución de $\text{PO}_4^{-3}$	18
5. Variación del contenido en $\text{CO}_2$ en las francolitas con exceso de fluor, en función de las edades geológicas	19
6. Francolitas con exceso de fluor. Correlación entre la relación $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$ y el $\text{P}_2\text{O}_5$ soluble en el CAN	20
7. Relación entre el valor del parámetro cristalográfico $a$ y la solubilidad en el CAN para las hydroxiapatitas, fluorapatitas y carbonatoapatitas	21
8. Solubilidad en el CAN de las rocas fosfóricas sedimentarias de diversos países	22
9. Diagrama de flujo del proceso de caracterización de las rocas fosfóricas en el IFDC	24
10. Análisis modal aproximado de la muestra de fosforita número 1	26
11. Cinética de la solubilización continua de las rocas fosfóricas con el ácido fórmico	31
12. Representación esquemática de una curva de respuesta de un cultivo a la aplicación de roca fosfórica en un suelo severamente deficiente en P	47
13. Efecto de la acidulación parcial de la roca fosfórica Mussoorie sobre los rendimientos de arroz (suelo pH 7,9) y trigo (suelo pH 6,0)	54
14. Relación entre la absorción de fósforo por la planta y el fósforo disponible en el suelo proveniente del superfosfato triple y de la roca fosfórica aplicados a un suelo ácido	64
15. Relación entre la producción de materia seca y el fósforo extraído por el método Bray I en los suelos tratados con rocas fosfóricas y superfosfato triple	66
16. Relación entre la producción de materia seca de maíz con diversas fuentes fosfatadas y el fósforo extraído con Bray I en: (a) un suelo arenoso ácido (pH 4,8) de bajo poder tampón de pH y (b) en un suelo ácido (pH 5,2) con alta capacidad de retención de P	66
17. Relación entre la producción de materia seca de maíz y (a) el fósforo extraído con Bray II, y (b) el fósforo extraído con Mehlich I en un suelo tratado con el SFT y la RF de Florida central	67
18. Relación entre la producción de pasturas y los valores de P-Olsen en los suelos tratados con la RF de Sechura (RFS) y (a) el fosfato monocálcico (FMC), y (b) el SFT	68
19. Relación entre la absorción de P por el maíz y el fósforo extraído por el método Bray I en los suelos tratados con el SFT y la RF de Carolina del Norte (RF-CN)	70
20. Relación entre la absorción de P por el maíz y el P-Pi ( $\text{CaCl}_2$ 0,01 M) en los suelos tratados con el SFT y RF de Carolina del Norte	70

21. Relación entre la absorción de P por el maíz y el P-Pi (KCl 0,02 M) en los suelos tratados con el SFT y la RF de Carolina del Norte	71
22. P-Pi extraído con CaCl <sub>2</sub> 0,01 M y con KCl 0,02 M en los suelos tratados con la RF de Carolina del Norte	71
23. P-Pi extraído con CaCl <sub>2</sub> 0,01 M y con KCl 0,02 M en los suelos tratados con el SFT	72
24. Diagrama mostrando el proceso para determinar la factibilidad de utilización de las rocas fosfóricas para la aplicación directa	76
25. Relación entre la concentración máxima de P en la solución suelo y la relación molar CO <sub>3</sub> /PO <sub>4</sub> en la estructura de la apatita	84
26. Relación entre la absorción de calcio por el maíz y la solubilidad en el citrato de diversas rocas fosfóricas	84
27. Respuesta del arroz de secano a la RF de Huila y al SFT en un Oxisol	86
28. Efecto de la RF de Sechura y del SFT sobre la concentración de molibdeno en el trébol	86
29. Evolución del aluminio y del calcio intercambiables durante la incubación de un Oxisol tratado con RF y SFT (200 mg P/kg)	87
30. Efecto de las fuentes de fósforo sobre la producción de materia seca (suma de tres cortes) de <i>Panicum maximum</i> cultivado en un Oxisol	88
31. Relación entre el grado de acidulación de la RF de Carolina del Norte con (A) el ácido fosfórico y (B) el ácido sulfúrico y el contenido de fósforo total y de fósforo soluble en el agua de los productos de la reacción	99
32. Sinergias de la producción de la RFPA y del ácido fosfórico	122
33. Sinergia de producción entre la roca fosfórica parcialmente acidulada y el ácido fosfórico	124

# Prólogo

Esta publicación trata de la aplicación directa de la roca fosfórica en la agricultura. El fósforo es un elemento nutritivo esencial para las plantas y su deficiencia reduce severamente los rendimientos de los cultivos. Los suelos tropicales y subtropicales son en su mayoría ácidos, a menudo fuertemente deficientes y con un alto poder de retención o fijación del fósforo. En vista de ello, es necesario aplicar cantidades importantes de insumos fosfóricos para obtener un crecimiento óptimo de los cultivos y la producción adecuada de alimentos y fibras.

Los fertilizantes fosfatados solubles en agua tales como los superfosfatos son fabricados y comúnmente recomendados para corregir las deficiencias fosfóricas; sin embargo, la mayoría de los países en desarrollo deben importar estos fertilizantes, los que se encuentran en cantidades limitadas y representan un gran desembolso para los pequeños agricultores. Además, la intensificación de la producción agrícola requiere la aplicación de fósforo no sólo para aumentar la producción de los cultivos sino también para mejorar el nivel de este elemento en los suelos y así evitar una mayor degradación de los mismos. Por lo tanto, es imperativo explorar fuentes fosfóricas alternativas. Bajo ciertas condiciones de suelo y de clima, la aplicación directa de las rocas fosfóricas, especialmente si se hallan disponibles localmente, ha demostrado ser una alternativa interesante a los superfosfatos, tanto agronómica como económicamente, ya que estos últimos son de mayor costo. Existen depósitos de roca fosfórica en todo el mundo y algunos son explotados principalmente como materia prima para la producción de fertilizantes fosfatados solubles en agua.

La División Mixta FAO/OIEA de Técnicas Nucleares en la Agricultura y la Alimentación inició un proyecto de investigación coordinada titulado «Utilización de las técnicas nucleares y conexas en la evaluación de la eficiencia agronómica de los fertilizantes fosfatados, en particular de las rocas fosfóricas». Este proyecto fue ejecutado por institutos de países en desarrollo y de países industrializados durante el período 1993-1998. Los resultados obtenidos aportaron nueva información sobre la química del fósforo del suelo; los métodos para analizar el fósforo disponible en el suelo; la nutrición fosfórica de los cultivos; la eficiencia agronómica de las rocas fosfóricas naturales y sus productos derivados así como recomendaciones sobre el uso de los fertilizantes fosfatados, con énfasis en la utilización de las rocas fosfóricas.

Dentro del marco de los sistemas integrados de nutrición de las plantas promovidos por el Servicio de Cultivos y Pasturas (AGPC) de la FAO y los planes de acciones nacionales para mejorar la productividad de los suelos en los países subsaharianos mediante la Iniciativa para la Fertilidad del Suelo, las rocas fosfóricas están consideradas como fuentes de fósforo potencialmente importantes, disponibles localmente. AGPC ha ejecutado diversos estudios sobre la evaluación agroeconómica de las rocas fosfóricas para su aplicación directa en países seleccionados. Resultados de utilidad práctica y directivas de política pueden ser extraídos de dichos estudios.

Diversas organizaciones han realizado numerosas investigaciones sobre la utilización de los depósitos de rocas fosfóricas locales en los suelos tropicales de América Latina, África, Asia y otros. Durante la última década, se han obtenido avances notables en la utilización de las fuentes de roca fosfórica para su aplicación directa en los sistemas de producción agrícola en todo el mundo. Existe una gran cantidad de información que se halla dispersa en múltiples publicaciones.

Reconociendo la necesidad de una divulgación más amplia de la información disponible, la División Mixta FAO/OIEA conjuntamente con AGPC organizaron

una reunión de expertos en noviembre de 2001, en Viena, para revisar los avances realizados en los aspectos de investigación y desarrollo y preparar una propuesta para la preparación de este boletín técnico. F. Zapata (OIEA, Viena) y R.N. Roy (FAO, Roma) se encargaron de ejecutar esta tarea. Fueron invitados especialistas sobre el tema para contribuir en la preparación de los capítulos de esta publicación.

Este documento presenta los resultados de estudios sobre la utilización de la roca fosfórica para su aplicación directa en la agricultura llevados a cabo en un amplio rango de condiciones agroecológicas con miras a promover la intensificación agrícola sostenible en los países en vías de desarrollo de las regiones tropicales y subtropicales. Los temas de estudio se encuentran en doce capítulos, desarrollados por un grupo de expertos involucrados en la investigación sobre rocas fosfóricas y que trabajan en un amplio rango de disciplinas que incluyen geología, química, ciencias del suelo, agronomía, economía y otras. Además esta publicación incluye una extensa bibliografía sobre los temas tratados.

El Capítulo 1 proporciona información básica sobre el fósforo como elemento nutritivo esencial de las plantas, el nivel fosfórico del suelo, la necesidad de aplicar fertilizantes fosfatados y el potencial para utilizar las rocas fosfóricas en el contexto de la seguridad alimentaria, la degradación de los suelos y la protección del medio ambiente. Describe generalidades sobre la naturaleza y variabilidad de las fuentes de las rocas fosfóricas en todo el mundo y proporciona una revisión general sobre trabajos pasados y presentes así como las perspectivas sobre la utilización de la roca fosfórica para la aplicación directa en la agricultura. El Capítulo 2 presenta los tipos y distribución de los depósitos geológicos de roca fosfórica en el mundo; proporciona información sobre los inventarios de las reservas, los niveles de producción de roca fosfórica y su consumo para la aplicación directa. El Capítulo 3 describe la caracterización de las rocas fosfóricas debido a su amplia variabilidad para fines de utilización tanto como materia prima para la fabricación de fertilizantes fosfatados como para su aplicación directa en la agricultura. Incluye información sobre la composición mineralógica de los minerales fosfatados -principales y accesorios-, en particular los parámetros cristalográficos y las fórmulas empíricas de las apatitas; la composición química (principales elementos químicos, incluyendo los microelementos, los metales pesados y los radionucleidos), los índices de solubilidad como indicadores de la reactividad y las propiedades físicas (distribución del tamaño de partículas, área específica y dureza). El Capítulo 4 examina los criterios y las metodologías para evaluar las rocas fosfóricas para la aplicación directa, tales como los índices de solubilidad, la incubación en el suelo, las pruebas en invernadero y los ensayos de evaluación de campo. Para cada criterio, el capítulo proporciona información y ejemplos sobre los objetivos, los métodos y las mediciones. Asimismo, describe brevemente las ventajas y limitaciones de los métodos y las consideraciones especiales para interpretar los resultados. El Capítulo 5 ofrece una revisión actualizada sobre los factores principales que influyen la eficiencia agronómica de las rocas fosfóricas. Los estudios de caso seleccionados a nivel regional proporcionan ejemplos de la influencia de estos factores y sus interacciones así como directivas económicas. El Capítulo 6 describe los métodos de análisis de fósforo del suelo para proveer recomendaciones para la aplicación de la roca fosfórica y se discuten los principios y consideraciones para interpretar los resultados sobre «el fósforo disponible». El Capítulo 7 enfoca la necesidad así como el desarrollo y evaluación de un sistema de apoyo a la toma de decisiones para predecir la eficiencia agronómica de las rocas fosfóricas para su aplicación directa y el uso de modelos para el fósforo. El Capítulo 8 examina el conocimiento actual y los vacíos que existen sobre los efectos de otros elementos químicos presentes en las rocas fosfóricas. Trata de elementos benéficos y peligrosos tales como el calcio, el magnesio, los microelementos, los metales pesados y los radionucleidos. El Capítulo 9 describe los métodos y las tecnologías para mejorar la eficiencia agronómica de las rocas fosfóricas locales. El Capítulo 10 estudia los criterios económicos a ser considerados en

la producción, la comercialización y la distribución de las rocas fosfóricas. Se discuten temas macro y microeconómicos y se incluyen estudios de caso sobre la explotación de los depósitos de roca fosfórica. El Capítulo 11 revisa las regulaciones existentes para la roca fosfórica de aplicación directa y propone directivas para ser consideradas por la legislación. El epílogo en el Capítulo 12 contiene las principales conclusiones y los tópicos que merecen consideración futura.

El objetivo de esta publicación es proporcionar informaciones actualizadas sobre la aplicación directa de la roca fosfórica en la agricultura. Este documento ha sido producido con un enfoque técnico e introduce directivas prácticas con el fin de ayudar a los encargados de tomar decisiones a nivel intermedio, a la comunidad científica, a los extensionistas de alto nivel, a organizaciones no gubernamentales y a otros participantes involucrados en el desarrollo agrícola. El objetivo final es lograr una amplia divulgación de la tecnología y va dirigido en particular a los encargados de determinar las políticas a todo nivel, los cuales pueden necesitar informaciones sobre la adopción de la roca fosfórica como una inversión de capital para iniciar una intensificación agrícola sostenible en los suelos ácidos de las zonas tropicales y subtropicales.

## Autores

- Capítulo 1** Introducción, por F. Zapata (FAO/OIEA, Austria) y R.N. Roy (FAO, Italia).
- Capítulo 2** Depósitos mundiales de fosfatos, por G.H. McClellan (Universidad de Florida, Estados Unidos de América) y S.J. Van Kauwenbergh (IFDC, Estados Unidos de América).
- Capítulo 3** Caracterización de las rocas fosfóricas, por S.J. Van Kauwenbergh (IFDC, Estados Unidos de América) y G.H. McClellan (Universidad de Florida, Estados Unidos de América).
- Capítulo 4** Evaluación de las rocas fosfóricas para la aplicación directa, por B. Truong (Francia).
- Capítulo 5** Factores que influyen la eficiencia agronómica de las rocas fosfóricas, incluyendo un análisis de estudios de caso, por S.S.S. Rajan (Universidad de Waikato, Nueva Zelanda), E. Casanova (Universidad Central de Venezuela, Venezuela) y B. Truong (Francia).
- Capítulo 6** Análisis del suelo para la aplicación de las rocas fosfóricas, por S.H. Chien (IFDC, Estados Unidos de América).
- Capítulo 7** Sistemas de apoyo a la decisión para el uso de las rocas fosfóricas, por P.W.G. Sale (Universidad de La Trobe, Australia) y L.K. Heng (FAO/OIEA, Austria).
- Capítulo 8** Los nutrientes secundarios, los micronutrientes, el efecto de encalado, y los elementos peligrosos asociados con el uso de las rocas fosfóricas, por S.H. Chien (IFDC, Estados Unidos de América).
- Capítulo 9** Métodos para mejorar la efectividad agronómica de las rocas fosfóricas, por S.S.S. Rajan (Universidad de Waikato, Nueva Zelanda).
- Capítulo 10** Factores económicos que influyen la adopción y la utilización de las rocas fosfóricas, por A. Kuyvenhoven (Universidad de Wageningen, Holanda), con una sección sobre comercialización de rocas fosfóricas locales para la aplicación directa, por S.H. Chien (IFDC, Estados Unidos de América) y una sección sobre criterios económicos para la adopción y utilización de rocas fosforicas – un estudio de caso en Venezuela, por E. Casanova (Universidad Central de Venezuela, Venezuela).
- Capítulo 11** Legislación y control de calidad de las rocas fosfóricas para la aplicación directa, por S.H. Chien (IFDC, Estados Unidos de América).
- Capítulo 12** Epílogo, por R.N. Roy (FAO, Italia) y F. Zapata (FAO/OIEA, Austria).

## Lista de abreviaciones y símbolos

AC	Ácido cítrico
AF	Ácido fórmico
BPL	Fosfatos tricálcicos de hueso (unidad del contenido de P de la roca fosfórica que indica su grado comercial) ( <i>Bone phosphate of lime</i> )
BRGM	Oficina de Investigación Geológica y Minera, Francia ( <i>Bureau de Recherche Géologique et Minière</i> )
CAN	Citrato de amonio neutro
CGIAR	Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional ( <i>Consultative Group for International Agricultural Research</i> )
CIAT	Centro Internacional para la Agricultura Tropical
CIP	Cinética de intercambio isotópico basado en el uso de $^{32}\text{P}$
CIRAD	Centro de Cooperación Internacional en Investigación Agronómica para el Desarrollo, Francia ( <i>Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement</i> )
CMDT	Compañía de Malí para el Desarrollo de los Textiles ( <i>Compagnie Malienne pour le Développement des Textiles</i> )
Cp	Concentración en iones P de la solución suelo
CR	Concentración de P en equilibrio de una roca fosfórica
Dm	Difusión media
DRX	Difracción de rayos X
E1	Valor E o P isotópicamente intercambiable en un minuto
EAR	Eficiencia agronómica relativa
ECC	Equivalente en carbonato de calcio
EDX	Análisis por espectrometría de dispersión de energía de rayos X ( <i>Energy dispersive X-ray analysis</i> )
FAO/IAEA	División Mixta FAO/IAEA de Técnicas Nucleares en la Agricultura y la Alimentación
Fertilizante P	Fertilizante fosfatado
FBN	Fijación biológica de nitrógeno
FDA	Fosfato diamónico
FMA	Fosfato monoamónico
FSA	Fosfato (fertilizante fosfatado) soluble en agua
FSU	Ex-Unión Soviética
ICRAF	Centro Internacional para la Investigación en Agroforestería ( <i>International Centre for Research in Agroforestry</i> )
IEA	Índice de eficiencia agronómica
IFDC	Centro Internacional para la Fertilidad del Suelo y el Desarrollo Agrícola, ex- Centro Internacional para el Desarrollo de Fertilizantes ( <i>International Fertilizer Development Center</i> )



---

IFS	Iniciativa para la Fertilidad del Suelo
IMPHOS	Instituto Mundial de los Fosfatos ( <i>Institut Mondial du Phosphate</i> )
ISA	Índice de solubilidad absoluta
L	Valor L o fósforo lábil
MEB	Microscopía electrónica de barrido (rastreo)
MSF	Microorganismos solubilizadores de fosfatos
MVA	Micorrizas vesículo-arbusculares
NORAGRIC	Universidad Agrícola de Noruega, Centro para el Medio Ambiente y Desarrollo Internacional
NPK	Fertilizante complejo (contiene nitrógeno, fósforo y potasio)
OIEA	Organismo Internacional de Energía Atómica
ONG	Organización No Gubernamental
PIC	Proyecto de investigación coordinada
Pi	Papel impregnado en óxido de hierro
PPCL	Piritas, Fosfatos y Compuestos Químicos Ltda., India ( <i>Pyrites, Phosphates and Chemicals Ltd., India</i> )
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente ( <i>United Nations Environment Programme</i> )
RELARF	Red Latinoamericana de Roca Fosfórica
RF	Roca fosfórica
RFAD	Roca fosfórica para aplicación directa
RFPA	Roca fosfórica parcialmente acidulada
RFR	Roca fosfórica reactiva
RF/S	Mezcla de roca fosfórica y de azufre elemental
RFs	Rocas fosfóricas, materiales de roca fosfórica, productos de roca fosfórica
RR	Respuesta relativa
SAD	Sistema de apoyo a la toma de decisiones
SAD-RF	Sistema de apoyo a la toma de decisiones para uso de las rocas fosfóricas
SADTA	Sistemas de apoyo a la decisión para la transferencia de agrotecnologías
SFET	Tecnología para mejorar la fertilidad del suelo ( <i>Soil fertility enhancing technology</i> )
SFS	Superfosfato simple, ordinario o normal
SFT	Superfosfato triple
UE	Unión Europea
UNIDO	Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial ( <i>United Nations for Industrial Development Organization</i> )
USBM	Oficina de Minas de los Estados Unidos de América ( <i>United States Bureau of Mines</i> )
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos de América ( <i>United States Geological Survey</i> )

---

VNA	Valor neto actual
VS	Valor de sustitución
VS50	Valor de sustitución del SFT (50 % del rendimiento máximo) por la roca fosfórica de Carolina del Norte
Al	Aluminio
As	Arsénico
C	Carbono
Ca	Calcio
Cd	Cadmio
Cl	Cloro
CO <sub>2</sub>	Anhídrido carbónico
Cr	Cromo
Cu	Cobre
F	Fluor
Fe	Hierro
H	Hidrógeno
Hg	Mercurio
K	Potasio
Mg	Magnesio
Mn	Manganeso
Mo	Molibdeno
N	Nitrógeno
Na	Sodio
O	Oxígeno
P	Fósforo
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Anhídrido fosfórico
Pb	Plomo
S	Azufre
Se	Selenio
Si	Silicio
U	Uranio
V	Vanadio
Zn	Zinc
<sup>32</sup> P	Fósforo 32- radioisótopo

# Agradecimientos

Diversos especialistas trabajando en el desarrollo y la utilización de las rocas fosfóricas contribuyeron a la redacción de los capítulos de esta publicación. Sus contribuciones son valiosas y altamente apreciadas.

Además de preparar los capítulos individuales que les fueron asignados, la mayoría de los autores también revisó algunos de los otros capítulos. Se agradece a todos ellos por sus esfuerzos en la revisión del documento.

Se agradece especialmente a R.N. Roy y F. Zapata por haber concebido, iniciado, proporcionado dirección técnica y revisado esta publicación. Asimismo se agradece a R.V. Misra e I. Verbeke por sus contribuciones en la finalización de este documento. También se agradece a F. Zapata, W. Burgos León y C. Rosell por la preparación de la edición en idioma español.

## Resumen

Con la finalidad de lograr la seguridad alimentaria en los países en vías de desarrollo es necesario intensificar de manera sostenible los sistemas de la producción agrícola para obtener incrementos de productividad y generar ganancias económicas. Dentro de este contexto deberán ser desarrolladas nuevas tecnologías para el manejo del suelo, específicas para las zonas de producción, evaluadas en pruebas piloto y transferidas a los agricultores en un plazo relativamente corto. El fósforo es un elemento nutritivo esencial para las plantas y los animales. El uso adecuado y racional de las rocas fosfóricas como fuente de fósforo puede contribuir a la intensificación agrícola sostenible en los países en vías de desarrollo, en particular en aquellos dotados con depósitos de roca fosfórica.

Roca fosfórica es un nombre colectivo utilizado para denominar todos los minerales que contienen fosfatos. Las rocas fosfóricas constituyen un recurso natural finito, no renovable y los depósitos geológicos de diferente origen se encuentran en todo el mundo. En la actualidad son explotados pocos yacimientos de roca fosfórica y cerca del 90 por ciento de la producción mundial es utilizada por la industria para la fabricación de fertilizantes fosfatados, mientras que el resto se emplea para la producción de alimentos para animales, detergentes y otros productos químicos. Sin embargo muchos yacimientos de roca fosfórica que se encuentran en las zonas tropicales y subtropicales no son explotados. Una razón es que las características de estas rocas fosfóricas, si bien son adecuadas para la aplicación directa, no reúnen las normas de calidad requeridas para producir fertilizantes fosfatados solubles en agua utilizando la tecnología convencional de procesamiento industrial. Otra razón es que los depósitos son demasiado pequeños para justificar las inversiones necesarias para su explotación minera y procesamiento.

Las rocas fosfóricas son la materia prima básica para la producción de los fertilizantes fosfatados. El compuesto fosfatado en las rocas fosfóricas es algún tipo de apatita. Según el origen del depósito de la roca fosfórica y su historia geológica, las apatitas pueden presentar propiedades físicas, químicas y cristalográficas diferentes. Con las rocas fosfóricas se hallan asociados grupos definidos de minerales accesorios de diversos orígenes y edades geológicas. Por lo tanto, es imperativo establecer procedimientos simples para la caracterización normalizada de las rocas fosfóricas, definir las normas de calidad para fines de la aplicación directa y luego clasificarlas. Las fuentes de roca fosfórica de calidad conocida pueden ser utilizadas como materiales de referencia para los fines de comparación.

Las características mineralógicas, químicas y texturales de los minerales de fosfatos y sus concentrados determinan: i) su conveniencia para los diversos tipos de procesos de «beneficio» o enriquecimiento para mejorar la calidad de los minerales y eliminar las impurezas, ii) su adecuación a los varios tipos de procesamiento químico y, iii) su capacidad para ser utilizada como roca fosfórica para la aplicación directa. Los factores más importantes en su evaluación para la aplicación directa son: el grado o ley, la conveniencia para el beneficio y la reactividad de la apatita. Una matriz completa de caracterización basada en la integración de todos los datos obtenidos por varios métodos analíticos determina el potencial de beneficio y los mejores usos posibles de la roca fosfórica en la producción de los fertilizantes fosfatados solubles o como fertilizante de aplicación directa.

Existen varios métodos para evaluar las rocas fosfóricas para fines de la aplicación directa. El primer grupo consiste en las pruebas empíricas de solubilidad de la roca fosfórica en soluciones químicas extractivas. Las soluciones más comunes son el citrato de amonio neutro, el ácido cítrico al 2 por ciento y el ácido fórmico al 2 por ciento; este

último es el método preferido. El tamaño de las partículas de la roca fosfórica y la presencia de los minerales asociados a la misma pueden influenciar los resultados de la prueba de solubilidad. Las técnicas radioisotópicas pueden ser utilizadas pero requieren personal entrenado y laboratorios especializados. Los estudios de incubación de la roca fosfórica con el suelo para su evaluación son relativamente simples. Sin embargo los estudios de la incubación cerrada presentan limitaciones porque los productos de la reacción no son extraídos y los resultados tendrían utilidad limitada salvo que se usen como información válida a corto plazo. Los experimentos en invernadero son interesantes porque permiten evaluar el desempeño de las rocas fosfóricas bajo condiciones controladas. Sin embargo es indispensable realizar la evaluación final de la eficiencia agronómica de las fuentes de roca fosfórica en una red de ensayos de campo establecidos en lugares representativos de las zonas agroecológicas de interés potencial y conducidos durante varios ciclos de cultivo. Se ha desarrollado una serie de recomendaciones para llevar a cabo dicha evaluación. Dicha evaluación es también necesaria para evaluar el potencial económico de los depósitos de roca fosfórica para consumo local.

Los factores que influyen sobre la eficiencia agronómica de las rocas fosfóricas son la reactividad, las características del suelo, las condiciones climáticas, la especie cultivada y las prácticas de manejo del cultivo. Una alta sustitución de fosfato por carbonato en la estructura del cristal de la apatita, un bajo contenido de carbonato de calcio como mineral accesorio y un tamaño de partícula fino ( $< 0,15$  mm) aumentan la reactividad de la roca y su efectividad agronómica. Existen métodos químicos rápidos para medir la reactividad de las rocas. El incremento de la acidez del suelo, una alta capacidad de intercambio catiónico, los niveles bajos de calcio y de fosfato en solución y un alto contenido de materia orgánica favorecen la solubilización de las rocas fosfóricas. Una alta capacidad de retención de fosfato en el suelo puede facilitar la solubilización de la roca fosfórica pero la disponibilidad del fosfato disuelto dependerá de la concentración de fosfato mantenida en la solución. Los suelos con un nivel medio en fosfato son considerados más adecuados para la aplicación de la roca fosfórica que los suelos extremadamente deficientes en fosfato. Un aumento de la precipitación pluvial resulta siempre en el mejoramiento de la eficiencia agronómica de las rocas fosfóricas. Una alta eficiencia agronómica de las rocas fosfóricas puede ser obtenida en los cultivos perennes y en las plantaciones así como con las leguminosas. Para obtener la máxima eficiencia agronómica, las rocas fosfóricas deben ser incorporadas al suelo. Mientras que la roca fosfórica puede aplicarse en una dosis de mantenimiento de P a los suelos de nivel medio o alto en fosfato, serán necesarias dosis muy altas de aplicación en los suelos severamente deficientes en fósforo. La época de aplicación puede ser cerca de la siembra en los suelos muy ácidos ( $\text{pH} < 5,5$ ) o unas 4 a 8 semanas antes de la siembra en los suelos menos ácidos.

El potencial de utilización de las rocas fosfatadas locales para la aplicación directa varía en cada país debido a la complejidad de las interacciones que ocurren entre los factores locales específicos y que son evidentes en el mundo tropical y subtropical. Los países con reservas importantes de rocas fosfatadas reactivas como Indonesia, Madagascar y Malí presentan gran potencial para la aplicación directa de las rocas fosfatadas. En los países dotados con reservas de rocas fosfatadas menos reactivas, tales como Brasil y Venezuela es factible modificar las rocas para mejorar su desempeño. En algunos casos, la ventaja económica para el agricultor puede ser considerable, tal como se ha demostrado en el caso de Venezuela. El estudio de caso de India demuestra que la sustitución de las importaciones es el principal beneficio económico del uso de la roca fosfatada local en Mussoorie. El estudio de caso de Nueva Zelandia ilustra la historia exitosa del uso de las rocas fosfatadas reactivas en la agricultura pastoral de Oceanía.

Los métodos convencionales para evaluar el fósforo disponible del suelo son utilizados para proporcionar las recomendaciones para la aplicación de fertilizantes fosfatados solubles en agua. Sin embargo, estos métodos pueden subestimar (por ejemplo Bray I,

Olsen) o sobreestimar (Bray II, Mehlich I) la disponibilidad de fósforo en los suelos fertilizados con la roca fosfatada, insoluble en agua. Son necesarias curvas de calibración separadas para estos dos tipos de fertilizantes. En este caso, el tema del desarrollo de métodos adecuados de análisis de suelos para la aplicación de las rocas fosfatadas ofrece una nueva dimensión a la investigación sobre el fósforo. Es necesario desarrollar métodos apropiados que reflejen estrechamente la disponibilidad del fósforo a través de un amplio rango de propiedades del suelo, de fuentes de roca fosfatada y de genotipos de los cultivos. Además, estos métodos deben ser adecuados para ambos casos, las rocas fosfatadas y los fosfatos solubles en agua. Recientemente se han desarrollado dos métodos promisorios: el método de la cinta de papel de filtro impregnado en óxido de hierro y el método de la membrana de resina de intercambio mixto catiónico/aniónico. En ambos casos, el P extraído simula la absorción de P por las raíces de las plantas sin emplear una reacción química de extracción como en los métodos convencionales. El P disponible medido en los suelos tratados con ambas fuentes ha demostrado: i) una buena correlación con la respuesta de la planta y, ii) ambas fuentes siguen la misma curva de calibración. Es necesario realizar ensayos de campo adicionales para evaluar su idoneidad para desarrollar las recomendaciones de la roca fosfórica para aplicación directa.

Con la finalidad de proporcionar directivas correctas sobre la roca fosfórica para aplicación directa es indispensable predecir su eficiencia agronómica, los incrementos de los rendimientos de los cultivos y las ganancias económicas. Diversos factores afectan la disolución de la roca fosfórica en el suelo dentro de un grupo de condiciones específicas. La utilización de la roca fosfórica para aplicación directa como fertilizante fosfatado es un tema más complejo, que implica la consideración de un cierto número de factores y sus interacciones. El desarrollo de un sistema de apoyo a la toma de decisiones es el método más eficiente para integrar todos estos factores y para proporcionar medios eficaces para la transferencia de los resultados de la investigación a los servicios de extensión. Los sistemas de apoyo a la toma de decisiones han sido construidos para utilizar información disponible para predecir si una roca fosfatada será eficiente en un cultivo y ambiente dados. Esta publicación analiza los diferentes tipos de sistemas de apoyo a la toma de decisiones, incluyendo los pasos seguidos para desarrollar un sistema de apoyo a la toma de decisiones para la roca fosfórica en Nueva Zelandia y en Australia. También describe los esfuerzos conjuntos desplegados actualmente por el Centro Internacional para la Fertilidad del Suelo y el Desarrollo Agrícola y la División Mixta FAO/OIEA para desarrollar un sistema global de apoyo a la toma de decisiones para uso en los países tropicales y subtropicales y para un amplio rango de cultivos alimenticios. Además, este sistema de apoyo a la toma de decisiones para la roca fosfórica podría ser conectado al modelo fosfato de la familia de los Sistemas de Apoyo a la Decisión para Transferencia de Agrotecnologías para predecir los rendimientos de los cultivos y también se podrían generar mapas de respuesta a la aplicación de las rocas fosfóricas basados en los Sistemas de Información Geográfica.

Los minerales que contienen fosfatos presentan una estructura compleja como resultado de su origen geológico y de los procesos de meteorización. Su composición mineralógica y química es extremadamente variable. Los estudios sobre la roca fosfórica para aplicación directa han enfocado mayormente su uso como fuente de P para la producción de cultivos en los suelos ácidos mientras que se han realizado pocas investigaciones sobre el efecto de otros elementos benéficos o peligrosos asociados con la utilización de la roca fosfórica. La información disponible ha sugerido que las rocas fosfóricas tienen un valor agronómico potencial para el crecimiento de los cultivos dependiendo del tipo de roca, como fuentes de elementos secundarios como el calcio y el magnesio y de microelementos como el zinc y el molibdeno. Las rocas fosfóricas reactivas que contienen carbonatos libres (calcita y dolomita) han demostrado que pueden reducir la saturación de aluminio de los suelos ácidos aumentando el pH del suelo y, por lo tanto, disminuyen la toxicidad de aluminio para las plantas. Asimismo

algunos estudios sugieren que la absorción de metales pesados tóxicos por las plantas, principalmente de cadmio, es significativamente menor a partir de la roca fosfórica que de los fertilizantes fosfatados solubles producidos de la misma roca. Son necesarias investigaciones adicionales para estudiar los elementos secundarios, los micronutrientes, el efecto de enclado y los elementos peligrosos asociados con el uso de las rocas fosfatadas.

No todas las fuentes de rocas fosfatadas son adecuadas para la aplicación directa. Sin embargo es posible utilizar diversos métodos para mejorar su efectividad agronómica bajo un grupo de condiciones particulares. La selección del método adecuado requiere un buen entendimiento de los factores que limitan la efectividad agronómica. Los métodos biológicos (por ejemplo la fosfocompostación, la inoculación con endomicorrizas vesículo-arbusculares, el uso de microorganismos solubilizadores de fosfatos y el uso de plantas con genotipos eficientes en la absorción del fósforo) están basados en la producción de ácidos orgánicos para aumentar la disolución de la roca fosfórica y la disponibilidad de P para las plantas. Estos métodos son promisorios. El uso de los métodos químicos para producir la roca fosfórica parcialmente acidulada es el medio más eficaz para aumentar la efectividad agronómica de las rocas fosfóricas y también ahorra energía. Sin embargo la producción de la roca fosfórica parcialmente acidulada siempre requiere plantas de fabricación de fertilizantes. El método físico de la mezcla en seco de la roca fosfórica con una proporción definida de fertilizante fosfatado soluble en agua es promisorio y rentable. Este método simple debería ser promovido y evaluado bajo las condiciones locales de suelo y clima.

En muchos países existe legislación sobre fertilizantes, especialmente en aquellos en vías de desarrollo. Su objetivo es asegurar que las especificaciones de calidad de los fertilizantes responden a las normas establecidas por el gobierno para proteger los intereses de los consumidores. Dado que el mayor volumen de la producción de las rocas fosfatadas es utilizado para la fabricación de los fertilizantes solubles en agua, existe relativamente poca información sobre la legislación de la roca fosfórica parcialmente acidulada. La eficiencia agronómica de la roca fosfatada para aplicación directa depende de muchos factores y de sus interacciones específicas. La legislación sobre la roca fosfórica parcialmente acidulada debería considerar tres factores principales: la reactividad de la roca fosfatada (solubilidad), las propiedades del suelo (principalmente el pH) y el cultivo. La legislación actual sobre roca fosfórica parcialmente acidulada considera solamente la calidad de la roca, es decir su contenido de fósforo ( $P_2O_5$ ) total, la distribución de tamaño de partículas y su solubilidad. En base a los resultados recientes de la investigación esta publicación propone diversas directivas relacionadas a los aspectos sobre la solubilidad de las rocas fosfatadas y sus interacciones en el complejo sistema suelo-planta y que son de interés para el establecimiento y revisión de la legislación existente.

Además de las consideraciones técnicas, un gran número de factores socioeconómicos y aspectos de política determinarán la producción, distribución, adopción y utilización de las rocas fosfóricas por los agricultores. En principio, su utilización debería ser promovida en los países donde están disponibles localmente. En los países sin depósitos de roca fosfórica, sería altamente recomendable poder acceder a un gran número de abastecedores de roca fosfórica en el mercado para estimular la competencia de precios.

En conclusión, la aplicación directa de la roca fosfórica en forma apropiada y racional puede contribuir significativamente a la intensificación agrícola sostenible utilizando los recursos naturales como nutrientes para las plantas. A pesar de que recientemente se han logrado avances notables en el conocimiento científico y los desarrollos tecnológicos sobre la roca fosfórica parcialmente acidulada todavía es necesario estudiar varios temas específicos.

## Capítulo 1

# Introducción

### EL FÓSFORO EN EL SISTEMA SUELO-PLANTA

El fósforo es un elemento ampliamente distribuido en la naturaleza y ocurre conjuntamente con el nitrógeno y el potasio como constituyente primario de los seres vivos, vegetales y animales. El fósforo posee una serie de funciones en el metabolismo vegetal y es uno de los nutrientes esenciales requeridos para el crecimiento y el desarrollo de las plantas. Desempeña funciones estructurales en las macromoléculas como los ácidos nucleicos y de transferencia de la energía en los procesos metabólicos de biosíntesis y degradación. A diferencia de los nitratos y sulfatos, los fosfatos no son reducidos en la planta y permanecen en su forma más altamente oxidada (Marschner, 1993).

El fósforo es absorbido principalmente durante el crecimiento vegetativo y luego la mayoría del fósforo absorbido es movilizado a los frutos y semillas durante las etapas reproductivas. Las plantas con deficiencias de fósforo tienen un crecimiento retardado (reducción del crecimiento celular y de la expansión foliar así como de la fotosíntesis y de la respiración) y a menudo presentan un color verde oscuro (más alta concentración de clorofila) y rojizo (aumento de la formación de antocianinas). Se ha indicado que el nivel de abastecimiento de fósforo durante los estados reproductivos regula el fraccionamiento entre las hojas y los órganos reproductivos, siendo este efecto esencial para las leguminosas fijadoras de nitrógeno (Marschner, 1993). Los animales y los seres humanos en buena salud requieren también cantidades adecuadas de fósforo en sus alimentos para que sus procesos metabólicos sean normales (FAO, 1984, 1995a).

Este elemento nutritivo es absorbido por las plantas a partir de la solución suelo como aniones ortofosfato monovalente ( $\text{H}_2\text{PO}_4$ ) y divalente ( $\text{HPO}_4$ ), cada uno representando un 50 por ciento del fósforo total en la solución a un pH cercano a la neutralidad (pH 6-7). A un pH entre 4 y 6, el anión ortofosfato monovalente ( $\text{H}_2\text{PO}_4$ ) representa casi el 100 por ciento del fósforo total en la solución. A un pH 8, el anión monovalente ( $\text{H}_2\text{PO}_4$ ) constituye el 20 por ciento y el divalente ( $\text{HPO}_4$ ) el 80 por ciento del fósforo total en la solución (Black, 1968).

La fisico-química del fósforo en los suelos minerales es bastante compleja debido a la ocurrencia de una serie de reacciones simultáneas e instantáneas tales como solubilización, precipitación, adsorción (retención)/desorción y oxido-reducción. Los compuestos solubles del fósforo presentan reactividad muy alta, solubilidad baja y movilidad reducida. La mineralización e inmovilización son procesos importantes del ciclo del fósforo en los suelos con alto contenido de materia orgánica (Black, 1968; FAO, 1984).

Cuando se aplica al suelo un fertilizante fosfatado soluble en agua, este reacciona rápidamente con los compuestos del suelo. Los productos resultantes son compuestos de fósforo menos solubles y el fósforo que es adsorbido sobre las partículas coloidales del suelo (FAO, 1984). Una pequeña concentración de fósforo en la solución del suelo es por lo general adecuada para el desarrollo normal de las plantas. Por ejemplo, Fox y Kamprath (1970) y Barber (1995) han sugerido que una concentración de 0,2 ppm de fósforo es suficiente para un crecimiento óptimo. Sin embargo, para que las plantas absorban las cantidades de fósforo necesarias para producir buenos rendimientos, la concentración de fósforo en la solución suelo que está en contacto con las raíces debe ser renovada continuamente durante todo el ciclo de crecimiento.



Bajo condiciones de cultivo continuo se deben aplicar insumos fosfóricos, en particular fertilizantes fosfatados solubles en agua, a fin de mantener el nivel fosfórico de los suelos fértiles o aumentar el de los suelos pobres en fósforo. Por lo tanto, el suelo, el cultivo, el agua, las prácticas de manejo del fertilizante fosfatado, las condiciones climáticas, entre otros, son factores importantes que deben ser considerados cuando se intenta formular recomendaciones correctas de la fertilización fosfatada y obtener respuestas adecuadas de los rendimientos de los cultivos (FAO, 1984; 1995a).

### LA NECESIDAD DE UN DESARROLLO SOSTENIBLE

De acuerdo a las proyecciones actuales la población mundial actual de 6 000 millones de personas alcanzaría unos 8 000 millones en el año 2020 y unos 9 400 millones en el año 2050. En ese entonces, la población del mundo en desarrollo será probablemente de 8 200 millones (Lal, 2000). Aproximadamente el 50 por ciento de las tierras potencialmente cultivables se hallan actualmente bajo cultivos anuales y permanentes. Además, una extensión de 2 000 millones de hectáreas está degradada y la degradación de las tierras avanza mediante una serie de procesos relacionados principalmente con el mal manejo de las tierras por el hombre (Oldeman, 1994; FAO, 1995b; UNEP, 2000).

En este contexto mundial, muchos países en vías de desarrollo enfrentarán grandes desafíos para lograr una seguridad alimentaria de una manera sostenible debido a una serie de razones tales como la superficie de tierra disponible por habitante, la seria escasez de los recursos de agua dulce, las condiciones socioeconómicas particulares del sector agrícola así como sus estructuras internas y conflictos (Hulse, 1995).

Aumentar la producción alimenticia de una manera sostenible requerirá un uso más adecuado de los recursos disponibles de tierra y agua, es decir: i) la intensificación agrícola en las mejores tierras cultivables, ii) la utilización adecuada de las tierras marginales y, iii) la prevención de la degradación de tierras y la rehabilitación de los suelos degradados.

Con la finalidad de incrementar la intensificación, la diversificación y la especialización de los sistemas de la producción agrícola para obtener ganancias en productividad y beneficios económicos, deberán ser desarrolladas nuevas tecnologías para el manejo del suelo, específicas para las zonas de producción, evaluadas en ensayos piloto y transferidas a los agricultores en un plazo relativamente corto. Estas tecnologías deberán atacar aspectos prioritarios tales como: i) el aumento de la intensidad de cultivo mediante la explotación de las diferencias genotípicas para la adaptación a los ambientes difíciles y para el uso eficiente de los nutrientes, ii) el incremento del uso eficiente de los nutrientes y de su reciclaje mediante el manejo integrado de las fuentes de nutrientes en los sistemas de cultivo, iii) la conservación del suelo y del agua mediante el manejo de los residuos de cosecha y la labranza de conservación y, iv) el mejoramiento del uso eficiente del agua a través del desarrollo de sistemas eficientes de riego, de recolección y de reciclaje del agua (Lal, 2000).

A fin de prevenir y controlar la degradación de los suelos, los temas principales relacionados con el desarrollo sostenible tratarán sobre el control de la erosión de los suelos y de la sedimentación asociada así como los riesgos de eutrofización de las aguas superficiales y de contaminación de las aguas subterráneas (UNEP, 2000). De la misma manera, otro tema importante de preocupación será incrementar el secuestro de carbono del suelo en las tierras agrícolas para mejorar la calidad y la productividad de los suelos y atenuar el efecto de invernadero (Lal, 1999).

La frontera agrícola probablemente se expandirá a las tierras marginales con condiciones ambientales difíciles y con suelos frágiles, de una menor capacidad productiva y un mayor riesgo de degradación. El empleo de genotipos de plantas con potencial de rendimiento adecuado, eficientes en el uso de los nutrientes y tolerantes a las condiciones de estrés de suelo y medio ambiente (sequía, acidez, salinidad, heladas) será de importancia estratégica. Su utilización está cobrando mayor importancia en

los programas de mejoramiento genético internacionales y nacionales (Date *et al.*, 1995; Pessaraki, 1999). Este enfoque está siendo actualmente utilizado en el manejo sustentable de los suelos ácidos, deficientes en fósforo (Rao *et al.*, 1999; Hocking *et al.*, 2000; IAEA, 2000; Keerthisinghe *et al.*, 2001).

El desarrollo y la aplicación de un enfoque integrado para el manejo de los nutrientes en la agricultura de los países en vías de desarrollo implicará el empleo de los fertilizantes químicos y las fuentes naturales de los nutrientes, tales como las rocas fosfóricas, la fijación biológica de nitrógeno, los estiércoles animales y los abonos verdes en combinación con el reciclaje de los residuos de las cosechas (FAO, 1995a). La utilización de estas tecnologías demanda la evaluación del suministro de los elementos nutritivos por los materiales localmente disponibles aplicados como fuente de nutrientes, su adaptación en función de los sistemas de cultivo específicos y la provisión de recomendaciones para su aplicación (FAO, 1998; Chalk *et al.*, 2002). Este es particularmente el caso de los recursos locales de rocas fosfatadas en las zonas tropicales.

### LA LIMITACIÓN DE FÓSFORO EN LOS SUELOS ÁCIDOS TROPICALES

Grandes extensiones de tierras en los trópicos y subtrópicos de África, Asia y América Latina poseen suelos ácidos altamente edafizados y de baja fertilidad natural. Estas áreas producen cultivos de bajos rendimientos y están sujetas a la degradación de las tierras debido a la deforestación, el sobrepastoreo y las prácticas agrícolas inadecuadas. Además de los factores socioeconómicos, las principales limitaciones son la acidez del suelo y la baja fertilidad natural de nitrógeno y fósforo (Lal, 1990; Formoso, 1999). Mientras que los insumos nitrogenados pueden ser obtenidos a partir de la fijación biológica del nitrógeno, los residuos de cosechas y otras fuentes orgánicas, el fósforo debe ser aplicado para mejorar el nivel fosfórico del suelo y asegurar el desarrollo normal de las plantas así como los rendimientos adecuados. Los suelos de las zonas tropicales y subtropicales son en su mayoría ácidos, a menudo severamente deficientes y con alta capacidad de retención de fósforo. Por lo tanto, se necesitan cantidades importantes de insumos fosfóricos para un crecimiento óptimo y una producción adecuada de alimentos y fibras (Sánchez y Buol, 1975; Date *et al.*, 1995).

Los fertilizantes fosfatados solubles en agua tales como los superfosfatos son normalmente recomendados para corregir las deficiencias de fósforo. Sin embargo la mayoría de los países en vías de desarrollo debe importar estos fertilizantes, los que a menudo se hallan en abastecimiento limitado y representan un gran desembolso para los agricultores de escasos recursos económicos. Por otro lado la intensificación de la producción agrícola en estas regiones demanda la aplicación de los insumos fosfóricos no solamente para aumentar la producción de los cultivos sino también para mejorar el nivel fosfórico de los suelos y así evitar una mayor degradación. Por consiguiente, resulta indispensable la búsqueda de fuentes alternativas de insumos fosfóricos. En este contexto, bajo ciertas condiciones de suelo y de clima, la aplicación directa de las rocas fosfóricas es una alternativa agronómica y económicamente correcta para los superfosfatos más caros en las regiones tropicales (Chien y Hammond, 1978; Truong *et al.*, 1978; Zapata *et al.*, 1986; Hammond *et al.*, 1986b; Chien y Hammond, 1989; Chien *et al.*, 1990; Sale y Mokwunye, 1993).

### USO DE LAS ROCAS FOSFÓRICAS EN LA INDUSTRIA Y LA AGRICULTURA

Se denomina roca fosfórica al producto obtenido de la extracción de una mina y del procesamiento metalúrgico subsiguiente de los minerales fosfatados. Además del mineral fosfatado principal, los depósitos de roca fosfórica también poseen minerales accesorios e impurezas llamados «ganga». Si bien cantidades importantes de los minerales accesorios y de las impurezas son eliminadas durante el proceso de beneficio, el mineral beneficiado siempre contiene algunas de las impurezas originales. Tales

impurezas incluyen sílice, minerales arcillosos, calcita, dolomita y óxidos hidratados de hierro y aluminio en diversas combinaciones y concentraciones, algunos de los cuales pueden tener una influencia profunda en la eficiencia de la roca fosfatada utilizada para la aplicación directa (UNIDO e IFDC, 1998). Roca fosfórica es el nombre común comercial de unos 300 fosfatos de diferentes calidades en conocidos en el mundo (Hammond y Day, 1998).

Las rocas fosfóricas pueden ser utilizadas ya sea como materia prima para la fabricación industrial de los fertilizantes fosfatados solubles en agua o bien como fuentes de fósforo para la aplicación directa en la agricultura.

### Las rocas fosfóricas como materia prima para la fabricación de fertilizantes fosfatados

La industria mundial de los fosfatos está basada en la explotación de algunos depósitos de rocas fosfóricas. A pesar de su composición extremadamente variable, son la fuente comercial de fósforo utilizada como materia prima para la fabricación de fertilizantes fosfatados y otros productos químicos. A diferencia de otros productos básicos como el hierro, el cobre y el azufre, las rocas fosfóricas tienen escasa oportunidad de sustitución o de reciclado. Ocupan el segundo puesto (excluidos el carbón y los hidrocarburos) en peso y volumen brutos en el comercio internacional.

La industria de los fertilizantes consume cerca del 90 por ciento de la producción mundial de roca fosfórica. El ácido sulfúrico y la roca fosfórica son las materias primas para la producción del superfosfato simple y del ácido fosfórico. El ácido fosfórico es un importante producto intermediario para producir el superfosfato triple y los fosfatos de amonio. Los fertilizantes compuestos N-P-K de alta concentración constituyen actualmente la base principal de la industria mundial de los fertilizantes (Engelstad y Hellums, 1993; UNIDO e IFDC, 1998).

Las rocas fosfóricas son también utilizadas para fines industriales y para la producción de productos alimenticios y de suplementos para la alimentación de animales. Otro uso importante es la fabricación del fósforo elemental y de sus derivados, en particular el tripolifosfato de sodio, que es el compuesto principal de los detergentes de alto poder para el lavado de ropa (Hammond y Day, 1992; UNIDO e IFDC, 1998).

Los depósitos de roca fosfórica se hallan ampliamente distribuidos en todo el mundo, tanto geográfica como geológicamente y los enormes recursos existentes son capaces de satisfacer la demanda estimada en un futuro previsible. Las estimaciones indican generalmente unas 200 000 a 300 000 millones de toneladas de rocas fosfóricas de todos los grados. Una gran proporción de estas cantidades totales estimadas incluye los depósitos ricos en carbonatos, cuya explotación comercial depende ya sea del desarrollo de nuevas tecnologías de beneficio o bien de cambios en las condiciones económicas (British Sulphur Corporation Limited, 1987; Notholt *et al.*, 1989).

Cerca del 80 por ciento de la producción mundial de roca fosfórica proviene de los depósitos de origen sedimentario marino, un 17 por ciento es de origen ígneo y de sus productos derivados de la meteorización; el resto proviene de los depósitos sedimentarios residuales y de tipo guano.

Las rocas fosfóricas sedimentarias están compuestas principalmente de apatitas. Estas apatitas poseen una amplia sustitución isomórfica en la red cristalina y, por lo tanto, poseen una gran variación en su composición química mostrando un amplio rango de propiedades. En los depósitos sedimentarios, los principales minerales fosfatados son las francolitas (fluorapatitas carbonatadas microcristalinas) que ocurren asociadas a una gran cantidad de minerales accesorios e impurezas (McClellan y Van Kauwenbergh, 1990a).

El contenido de fósforo total (grado/ley) de la roca fosfórica se expresa convencionalmente como pentóxido de fósforo ( $P_2O_5$ ). En algunos depósitos comerciales de bajo grado, este contenido puede ser tan bajo como cuatro por ciento. En la industria

de los fosfatos, el contenido de fósforo de la roca es normalmente expresado como fosfato tricálcico y se denomina tradicionalmente como BPL o fosfatos tricálcicos de hueso ( $P_2O_5 \times 2,1853 = BPL$ ). Este último nombre se origina en la época en que los huesos eran la fuente principal de fosfatos para la industria de los fertilizantes. Los productores del ácido fosfórico y de los fertilizantes fosfatados exigen normalmente un contenido mínimo de 28 por ciento de  $P_2O_5$  y la mayoría de las rocas fosfóricas comercializadas poseen más del 30 por ciento (65 por ciento BPL). Para reunir estos requerimientos, la mayoría de los minerales fosfatados deben seguir procesos de beneficio o enriquecimiento mediante lavado y tamizado, eliminación de carbonatos, separación magnética y flotación (Hammond y Day, 1992; UNIDO e IFDC, 1998).

### La roca fosfórica para aplicación directa en la agricultura

Las rocas fosfóricas de origen sedimentario son aptas para aplicación directa porque consisten de agregados de microcristales ampliamente abiertos y débilmente consolidados, con un área específica relativamente grande. Presentan una proporción considerable de sustitución isomórfica en la red cristalina y contienen minerales accesorios e impurezas en cantidades y proporciones variables. Diversos autores han indicado que estas rocas son adecuadas para la aplicación directa a los suelos bajo ciertas condiciones (Khasawneh y Doll, 1978; Chien, 1992; Chien y Friesen, 1992; Chien y Van Kauwenbergh, 1992; Chien y Menon, 1995b; Rajan *et al.*, 1996; Zapata, 2003).

La práctica de la aplicación directa de diversas fuentes de rocas fosfóricas como fertilizantes presenta muchas ventajas.

- Las rocas fosfóricas son minerales naturales que necesitan un mínimo de procesamiento metalúrgico. La aplicación directa de las rocas fosfóricas evita el proceso tradicional de la acidificación húmeda para producir los fertilizantes fosfatados solubles en agua y evita el ciclo de producción de los desechos contaminantes tales como el fosfoyeso y los gases de invernadero, teniendo como resultado economías de energía y la protección del medio ambiente de la contaminación industrial.
- Al ser productos naturales, las rocas fosfóricas pueden ser utilizadas en la agricultura biológica.
- La aplicación directa permite el empleo de las fuentes de rocas fosfóricas que no pueden ser utilizadas en la industria para la producción de los fertilizantes fosfatados solubles en agua y del ácido fosfórico.
- Bajo ciertas condiciones, las rocas fosfóricas reactivas pueden ser más eficientes que los fertilizantes fosfatados solubles en agua en base a la recuperación del fósforo por las plantas.
- En base al costo por unidad de fósforo, las rocas fosfóricas locales son normalmente los productos más económicos.
- Debido a su composición química extremadamente variable y compleja, las rocas fosfóricas son fuentes de varios elementos nutritivos además del fósforo. Son aplicadas comúnmente para mejorar el nivel fosfórico del suelo pero cuando se solubilizan también liberan otros nutrientes presentes en la roca. La aplicación de las rocas fosfóricas de reactividad media a alta en suelos ácidos tropicales altamente edafizados tiene un efecto potencial de «arranque» sobre el crecimiento de las plantas y el rendimiento de los cultivos, como resultado no sólo del aporte de fósforo sino también del incremento del calcio intercambiable y de la reducción de la saturación del aluminio. Los productos cosechados y sus residuos tienen una mejor calidad nutricional (contenido de P más alto que las plantas no fertilizadas). La incorporación de tales residuos orgánicos mejora la actividad biológica del suelo y la acumulación del carbono en el suelo, contribuyendo a mejorar sus propiedades físicas y químicas. De este modo, las rocas fosfóricas desempeñan una función importante contribuyendo al mejoramiento de la fertilidad del suelo

y al control de su degradación, en particular para evitar la explotación mineral (empobrecimiento) de los nutrientes.

Sin embargo esta práctica tiene también algunas limitaciones:

- No todas las rocas fosfóricas son adecuadas para la aplicación directa. La eficiencia de algunas rocas de reactividad media a baja debe ser mejorada mediante procesos biológicos y físico-químicos. Se deben desarrollar y probar tecnologías específicas y se debe realizar una evaluación económica en cada caso.
- No todos los suelos y los sistemas de cultivos son adecuados para las rocas fosfóricas de origen diferente. Es necesaria una caracterización normalizada de las rocas fosfóricas así como directivas para realizarla.
- No se conocen bien los factores principales y las condiciones que determinan la eficiencia agronómica de las rocas fosfóricas por lo que no es factible predecir su eficacia; asimismo, es necesario realizar una evaluación de los factores socioeconómicos, los beneficios financieros y las políticas de los gobiernos. En este sentido, se van realizando avances con el desarrollo de los sistemas de apoyo a la toma de decisiones para integrar todos los factores que afectan el uso y la adopción de la tecnología de la roca fosfórica.
- El grado muy bajo de algunas rocas fosfóricas comparado con los fertilizantes fosfatados comerciales de alto grado las hace más caras para su aplicación. Esta evaluación económica es muy dinámica y debería hacerse en el momento de la explotación del depósito de la roca fosfórica.
- Las rocas fosfóricas sedimentarias presentan una estructura muy compleja como resultado de su origen diferente en la naturaleza y aún dentro de un depósito geológico particular. Poseen una composición química extremadamente variable y pueden contener elementos tales como los metales pesados y aún radionucleidos que, en ciertas concentraciones y cuando la roca se disuelve en el suelo, pueden ser dañinos.

Cabe mencionar que diversos proyectos de investigación sobre la utilización de las rocas fosfóricas han logrado recientemente avances considerables aclarando muchos de los puntos antes mencionados.

### **Reseña histórica sobre el uso de las rocas fosfóricas en la agricultura**

La aplicación directa de las rocas fosfóricas naturales molidas como fuente de fósforo para los cultivos es una práctica que ha gozado de diversos grados de aceptación a través del tiempo. Durante los últimos 100 años o más se han realizado numerosos experimentos en invernadero y en el campo para evaluar la capacidad de estos materiales, proporcionar fósforo a los cultivos y determinar las condiciones más favorables para su aplicación. Los resultados obtenidos han sido considerados como irregulares y algunas veces contradictorios llevando a confusión y desacuerdo sobre la utilización de las rocas fosfóricas (Khasawneh y Doll, 1978).

En general, los experimentos conducidos en el pasado han mostrado que las rocas fosfóricas eran más eficaces cuando se aplicaban a los cultivos perennes de plantaciones en los suelos ácidos tropicales. Además, las rocas locales eran consideradas como una posible fuente adecuada de fósforo en las condiciones donde se esperaban rendimientos por debajo del óptimo debido a limitaciones en el uso de los insumos complementarios, por ejemplo en los sistemas extensivos de pasturas. Sin embargo, en la mayoría de los casos no se ha obtenido ninguna evidencia concluyente a favor o contra su adopción.

La razón principal de esta situación era la falta de comprensión de los diversos factores que afectan la eficiencia agronómica de las rocas fosfóricas. Desde entonces, se han logrado avances importantes en la evaluación de los principales factores que influyen su eficiencia agronómica. En este sentido, un trabajo importante que sirve de punto de referencia fue la revisión completa hecha por Khasawneh y Doll, 1978, quienes analizaron la influencia de los factores intrínsecos de la roca fosfórica

(mineralogía, composición química, pruebas de solubilidad y propiedades físicas), los factores de suelo (pH, textura, materia orgánica del suelo, nivel fosfórico del suelo, P disponible, retención de P, contenido de calcio, entre otros) y los factores de las plantas (ciclo de desarrollo, demanda de P, patrón de absorción de P, sistema radicular, propiedades de la rizósfera).

Hammond *et al.* (1986b) realizaron una revisión detallada del valor agronómico de las fuentes locales de rocas fosfóricas localizadas en los trópicos, resaltando el uso potencial de los productos parcialmente acidulados a través de América Latina, Asia y África. Más recientemente, una revisión actualizada con enfoque en los principios básicos de la disolución de las rocas fosfóricas en los suelos, los conceptos sobre su efectividad agronómica y los métodos para evaluar los factores económicos relacionados a la utilización de las mismas han sido realizadas por Rajan *et al.* (1996).

Proyectos nacionales sobre la utilización de las rocas fosfóricas en pasturas en diferentes localidades han sido ejecutados durante más de 50 años en Nueva Zelanda y en Australia (Bolan *et al.*, 1990; Rajan, 1991a, 1991b; Bolland *et al.*, 1997). En Nueva Zelanda se llevaron a cabo ensayos en el campo con las rocas fosfóricas reactivas a comienzos de la década de 1980 (Hedley y Bolan, 1997; 2003) y en Australia durante el período 1991-1996 con la ejecución del Proyecto Nacional sobre las rocas fosfóricas reactivas (Simpson *et al.*, 1997; Sale *et al.*, 1997a). En ambos países se lograron avances importantes en la determinación de las condiciones de suelo, clima y pasturas bajo las cuales esas rocas eran productos eficaces de sustitución con respecto a los fertilizantes fosfatados solubles en agua y en la definición del nivel de reactividad requerido para que las rocas fosfóricas sean eficaces.

Durante cierto tiempo también han operado redes regionales en las zonas tropicales y subtropicales de América Latina (Red Latinoamericana de Roca Fosfórica-RELARF) y de Asia (Programa del Instituto de la Potasa y Fosfatos de Canadá para el Este y Sureste de Asia). Han organizado reuniones periódicas para informar sobre los resultados de sus investigaciones (Dahyanake *et al.*, 1995; Hellums, 1995a; Johnston y Syers, 1996; Casanova y López Pérez, 1991; Casanova, 1995, 1998; RELARF, 1996; Zapata *et al.*, 1994; Besoain *et al.*, 1999). Un cierto número de estudios también han sido realizados en casi todos los países de África pero los resultados se hallan dispersos en informes de circulación limitada. Truong *et al.* (1978) realizaron un estudio completo de diversas fuentes de rocas fosfóricas del África Occidental. Se han publicado diversos informes de reuniones regionales sobre el uso de los fertilizantes y los recursos minerales locales para una agricultura sostenible en África (Mokwunye y Vlek, 1986; Gerner y Mokwunye, 1995). Por otro lado se han producido recientemente informes resumiendo los resultados de los estudios sobre las rocas fosfóricas. Un informe de la FAO (2001b) presenta los resultados de los ensayos agronómicos de campo en el África occidental mientras que Appleton (2001) ha realizado una revisión completa de los recursos locales de los fosfatos en el África subsahariana en un contexto de desarrollo sostenible. Además, fueron organizadas periódicamente diversas reuniones internacionales por el Instituto Mundial de los Fosfatos (IMPHOS) que han proporcionado un foro internacional para presentar e intercambiar información sobre las investigaciones en los fosfatos (IMPHOS, 1983, 1992).

En la década de 1970, el Centro Internacional para la Fertilidad del Suelo y el Desarrollo Agrícola (IFDC) comenzó a realizar investigaciones con un enfoque particular en el uso de los depósitos locales de rocas fosfóricas como fuente de fósforo para la producción agrícola en los países en vías de desarrollo. Esta investigación ha sido un componente importante del programa de este Instituto por muchos años (Chien y Hammond, 1978, 1989; Chien *et al.*, 1987b; Chien y Friesen, 1992; Hellums *et al.*, 1990; Hellums, 1992; Chien, 1995; Chien y Menon, 1995b). Dicha investigación también incluía el desarrollo y la evaluación de las rocas fosfóricas modificadas así como su evaluación económica (Hammond *et al.*, 1986b; Menon y Chien, 1990, 1996;

Hellums *et al.*, 1992; Chien y Menon, 1995a; Baanante, 1998; Baanante y Hellums, 1998; Henao y Baanante, 1999). En la década de 1990 el IFDC inició investigaciones sobre los aspectos ambientales asociados a los fertilizantes fosfatados y a las rocas fosfóricas porque estos contienen una cantidad variable de elementos potencialmente peligrosos tales como los metales pesados (Hellums, 1995b; Iretskaya *et al.*, 1998; Iretskaya y Chien, 1999).

En el año 1994 el Banco Mundial, en colaboración con los centros que conforman el Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional y algunos grupos de investigación de universidades en los países industrializados, lanzó la iniciativa «Desarrollo de Estrategias Nacionales para la Recapitalización de la Fertilidad del Suelo en el África subsahariana» (World Bank, 1994; Valencia *et al.*, 1994; Buresh *et al.*, 1997; Baanante, 1998). Uno de los resultados fue la preparación del documento «Marco de los Planes Nacionales de Acción para el Mejoramiento de la Fertilidad del Suelo». Esta iniciativa incluyó el uso de las rocas fosfóricas como capital de inversión en los recursos naturales de África donde la situación es paradójica debido a que los suelos son extremadamente pobres en fósforo a pesar de que existen numerosos depósitos de roca fosfórica. El postulado era que una aplicación masiva de roca fosfórica podía superar el problema de la capacidad de retención de fósforo del suelo y aumentar el nivel del capital de fósforo del suelo. Posteriormente, pequeñas aplicaciones adicionales de los fertilizantes fosfatados solubles en agua estarían entonces más disponibles para los cultivos y con mayor eficiencia. El Banco Mundial solicitó a diversas organizaciones de investigación conducir estudios de caso en Burkina Faso, Madagascar y Zimbabwe. A pesar de que los resultados sugirieron que los recursos de rocas fosfóricas disponibles en estos países podían ser utilizados como un capital de inversión para aumentar el nivel fosfórico del suelo, no produjeron conclusiones debido a la falta de una evaluación completa de los factores que influenciaban el uso y la adopción de la tecnología de las rocas fosfóricas en cada país (World Bank, 1997).

Dentro del marco de los Sistemas Integrados de la Nutrición de las Plantas promovidos por la Dirección de Fomento de Tierras y Aguas de la FAO y los planes nacionales de acción sobre la Iniciativa para la Fertilidad del Suelo (IFS) para los países subsaharianos las rocas fosfóricas son consideradas como importantes insumos fosfatados potenciales, disponibles localmente, que pueden ser utilizadas provechosamente (FAO, 2001b). FAO ha realizado muchos estudios sobre la evaluación agroeconómica de las rocas fosfóricas para su aplicación directa en diversos países seleccionados. Es posible extraer resultados de utilidad práctica así como directivas de política de estos y muchos otros estudios.

Durante el período 1993-1999 la División Mixta FAO/OIEA de Técnicas Nucleares en la Agricultura y la Alimentación ejecutó un proyecto de investigación coordinada incluyendo 21 instituciones de países en desarrollo y de países desarrollados con el propósito de evaluar la eficiencia agronómica de los fertilizantes fosfatados, en particular de las rocas fosfóricas mediante el uso de las técnicas nucleares y conexas. Los resultados obtenidos demostraron su potencial para mejorar la fertilidad del suelo y aumentar la producción agrícola bajo ciertas condiciones. Los resultados han sido publicados en documentos de la OIEA y en revistas científicas (Zapata, 1995, 2000, 2002, 2003; IAEA, 2000, 2002). Actividades importantes de continuación de este proyecto han sido realizadas conjuntamente por la FAO/OIEA y el IFDC para desarrollar un sistema de apoyo a la toma de decisiones para la aplicación directa de las rocas fosfóricas y la preparación de un sitio en Internet así como de publicaciones técnicas para una divulgación más amplia de los resultados al personal profesional técnico y a los responsables de la toma de decisiones, incluyendo los extensionistas y los agricultores progresistas (Chien *et al.*, 1999; Heng, 2000, 2003; Singh *et al.*, 2003).

En vista de los desarrollos recientes y de las experiencias prácticas sobre las tecnologías para la aplicación directa de las rocas fosfóricas y de otras tecnologías relacionadas, el IFDC en colaboración con la Sociedad de la Ciencia del Suelo de

Malasia y el Instituto de la Potasa y Fosfato de Canadá -Programa para el Este y Sureste de Asia- organizó una reunión internacional en Kuala Lumpur. El evento atrajo más de 100 participantes de más de 30 países de todo el mundo representando diferentes redes nacionales e internacionales de investigación, productores, comerciantes y consumidores de las rocas fosfóricas para la aplicación directa. Los resultados más recientes de la investigación agronómica sobre el uso de las rocas fosfóricas naturales y sus productos modificados en función del origen de las fuentes de las rocas, los tipos de suelo, las prácticas de manejo y los sistemas de cultivo fueron revisados e información actualizada sobre la producción y uso agronómico de las mismas fue obtenida de los productores, comerciantes y consumidores. La reunión también sirvió como un foro internacional para discutir las estrategias futuras sobre el uso de las rocas fosfóricas locales o importadas para la aplicación directa a fin de incrementar la producción de los cultivos y reducir los costos de producción (IFDC, 2003).

En conclusión, amplias investigaciones sobre el potencial agronómico y la efectividad actual de las rocas fosfóricas como fuentes de fósforo se han llevado a cabo en África, Asia, América Latina y en otras partes del mundo. Existe una gran cantidad de información disponible que está distribuida en diversas publicaciones de reuniones, informes técnicos, publicaciones científicas y otras. De manera general, la información sobre la roca fosfórica para aplicación directa es limitada y todavía quedan áreas y tópicos asociados que requieren una atención continua.

## **EL BOLETÍN**

En base a las secciones anteriores, se puede también deducir que es necesario contar con una publicación de gran alcance que cubra los temas principales que tratan sobre la utilización de las rocas fosfóricas en la agricultura, incluyendo las informaciones recientes sobre la investigación en el tema y que proporcione directivas para su aplicación directa a los suelos ácidos de las zonas tropicales y subtropicales. Este Boletín tiene como objetivo cubrir esta necesidad. Está concebido como un documento de orientación técnica, que va dirigido a una audiencia específica compuesta por los responsables de la toma de decisiones y políticas, la comunidad científica, los extensionistas de alto nivel, el personal de las organizaciones no gubernamentales y otros participantes involucrados en el desarrollo agrícola sostenible a nivel local, regional e internacional.

Los capítulos de este Boletín revisan de manera general las bases científicas para la utilización de la roca fosfórica y proporcionan informaciones técnicas sobre los temas más pertinentes relacionados con su utilización para la aplicación directa. Presentan una información detallada de los depósitos de roca fosfórica en el mundo, la caracterización de las rocas fosfóricas, las metodologías de evaluación de las fuentes de rocas fosfóricas para la aplicación directa, un análisis de los factores biofísicos y de los factores de producción que influyen su efectividad agronómica y también un análisis de las condiciones socioeconómicas y otros factores que en última instancia determinan el uso y la adopción de las tecnologías de la roca fosfórica como un capital de inversión para iniciar una intensificación agrícola. Otros capítulos cubren además el desarrollo y uso de los sistemas de apoyo a la toma de decisiones para las rocas fosfóricas de aplicación directa, los métodos de análisis de fósforo del suelo para la aplicación de la roca fosfórica, las tecnologías disponibles para mejorar la efectividad agronómica de las fuentes locales la misma, los aspectos relacionados al medio ambiente y los dispositivos legales existentes. Como conclusión, en base al conocimiento actual y a las tecnologías disponibles, en el epílogo se definen las áreas futuras y las prioridades de investigación. En la bibliografía se proporciona una lista detallada de referencias.



## Capítulo 2

# Depósitos mundiales de fosfatos

Roca fosfórica es un nombre colectivo utilizado para describir todos los minerales presentes en la naturaleza que contienen una alta concentración de fosfatos. El término se refiere tanto a los minerales fosfatados no beneficiados como a los productos concentrados. Los depósitos sedimentarios han aportado cerca del 80-90 por ciento de la producción mundial durante los últimos 10 años. Ocurren en formaciones de edad geológica muy diferente, presentando una gama muy amplia de composiciones químicas y de formas físicas: frecuentemente se presentan como estratos gruesos relativamente horizontales o pueden encontrarse en la base de las zonas de deposición relativamente superficiales. Los depósitos que cuentan con la mayor producción mundial de roca fósforica se hallan en Marruecos y otros países de África, en los Estados Unidos de América, en el Cercano Oriente y en China. La mayor parte de los depósitos sedimentarios contienen la fluorapatita carbonatada (o carbonato-apatita) llamada francolita (McConnell, 1938). Las francolitas que poseen una elevada sustitución isomórfica de fosfato por carbonato, son las más altamente reactivas y las más apropiadas para la aplicación directa como fertilizantes o enmiendas del suelo (Capítulo 3).

Los depósitos ígneos han aportado de un 10 al 20 por ciento de la producción mundial en los últimos 10 años. Estos son explotados en Brasil, Canadá, la Federación Rusa, Finlandia, Sudáfrica y Zimbabwe pero también ocurren en Malawi, Sri Lanka y Uganda y en muchos otros lugares. Estos depósitos comúnmente contienen variedades de fluorapatita que son relativamente poco reactivas y, por lo tanto, son menos adecuadas para la aplicación directa. Los productos de la alteración de las apatitas ígneas y sedimentarias (minerales fosfatados de hierro y aluminio) en su estado natural no son generalmente útiles para la aplicación directa en la agricultura.

El fosfato es el componente de interés agronómico en estas rocas. Cuanto más alto es el contenido de fosfato ( $P_2O_5$ ) en forma de apatita, mayor es el potencial económico de la roca. Los factores tales como carbonatos libres, hierro, aluminio, magnesio y cloruros son importantes para la conversión química de las rocas fosfóricas en fertilizantes, pero los mismos a menudo no tienen utilidad cuando la roca va a ser utilizada para la aplicación directa (Gremillion y McClellan, 1975; McClellan y Gremillion, 1980; Van Kauwenbergh y Hellums, 1995).

### LA PRODUCCIÓN MUNDIAL DE ROCA FOSFÓRICA

El Cuadro 1 presenta la producción mundial de roca fosfórica en 1999, el año más reciente para el cual existen datos seguros. Los cuatro principales productores, Estados Unidos de América, China, Marruecos en el Sahara Occidental y la Federación Rusa, produjeron cerca del 72 por ciento de la producción total mundial. Los primeros 12 productores representan más del 93 por ciento del total mundial. Otros 20 países produjeron el 6-7 por ciento restante.

A nivel mundial, existe poca información sobre la producción y el consumo de la roca fosfórica para la aplicación directa y a menudo es difícil obtener y evaluar datos confiables. Muchos países no la clasifican como fertilizante y las estadísticas de consumo no la incluyen. Las informaciones deben ser obtenidas a través de canales informales y su calidad puede ser altamente variable. Puede ser necesario estimar la roca fosfórica para aplicación directa por diferencia sustrayendo la cantidad de la roca fosfórica utilizada para otros propósitos de la cantidad total importada o utilizada en

CUADRO 1  
Producción mundial de roca fosfórica, 1999

	Producción (1 000 toneladas)	Total mundial %
Estados Unidos de América	40 867	28,1
China	30 754	21,1
Marruecos y Sahara Occidental	21 986	15,1
Federación Rusa	11 219	7,7
<b>Subtotal</b>	<b>104 826</b>	<b>72,0</b>
Túnez	8 006	5,5
Jordania	6 014	4,1
Brasil	4 301	2,9
Israel	4 128	2,8
Sudáfrica	2 941	2,0
Siria	2 084	1,4
Senegal	1 879	1,3
Togo	1 715	1,2
<b>Subtotal</b>	<b>135 894</b>	<b>93,4</b>
India	1 623	1,1
Argelia	1 093	0,8
Egipto	1 018	0,7
México	955	0,7
Kazakistán	900	0,6
Finlandia	734	0,5
Vietnam	710	0,5
Islas Christmas	683	0,5
Islas Naurú	604	0,4
Irak	415	0,3
Venezuela	366	0,3
Canadá	350	0,3
Australia	145	0,1
Uzbekistán	139	<0,1
Zimbabwe	124	<0,1
Corea del Norte	70	<0,1
Sri Lanka	30	<0,1
Perú	15	<0,1
Colombia	4	<0,1
<b>Total Mundial</b>	<b>145 472</b>	<b>100,0</b>

Fuente: Mew, 2000.

CUADRO 2  
Consumo mundial de roca fosfórica para aplicación directa

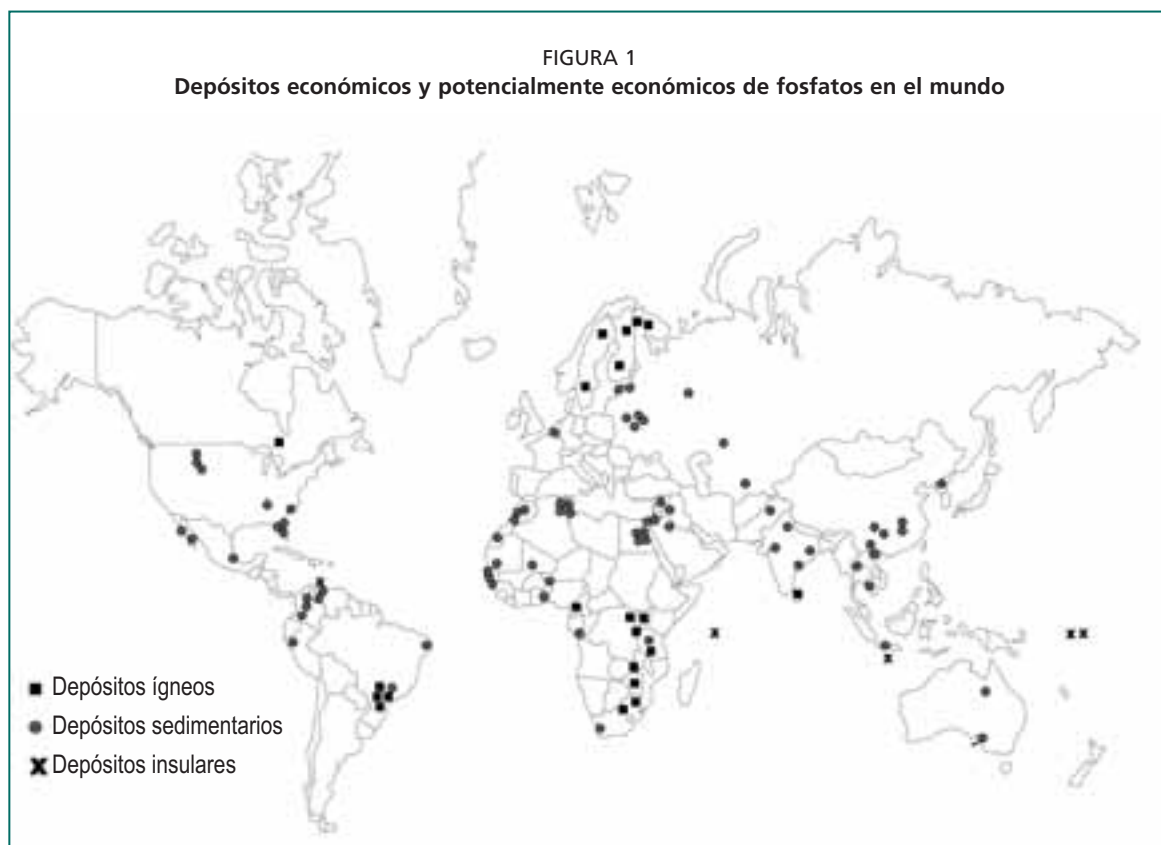
	Porcentaje del consumo mundial de fosfatos (en base de nutriente)	Volumen aproximado (millones toneladas al 30 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )
1975	5,6	4,8
1980	4,9	5,2
1985	4,0	4,5
1990	3,0	3,6
1991	1,7	2,0
1995	1,5	1,5
1998	1,4	1,5

Fuente: Van Kauwenbergh, 2003.

un país. Los datos sobre la roca fosfórica para aplicación directa presentados en este capítulo son indicativos más bien que datos reales.

Una evaluación del consumo mundial de la roca fosfórica de aplicación directa desde 1975 a 1998 (Cuadro 2) muestra una reducción del 5,6 al 1,4 por ciento del consumo total de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Esto es equivalente a cerca de 1,5 millones de toneladas de producto con un promedio de 30 por ciento de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Otra fuente (Maene, 2003) indica una disminución en su consumo de 1,66 millones de toneladas de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> en 1980 a 0,57 millones de toneladas de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> en 1998. Esto equivale al consumo de cerca de 1,9 millones de toneladas de producto al 30 por ciento de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> en 1998. Si bien es difícil determinar la cantidad exacta del consumo de la roca fosfórica para aplicación directa, parecería que el consumo mundial actual es menos de 2 millones de toneladas de producto. En la ex-Unión Soviética su consumo disminuyó en 900 000 toneladas a cerca de 350 000 toneladas en 1991, ya que anteriormente su uso había sido impuesto por el gobierno en las explotaciones agrícolas cooperativas. En China, el consumo de la roca fosfórica para aplicación directa disminuyó desde cerca de 300 000 toneladas de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> a mediados de 1980 hasta menos de 30 000 toneladas en 1995 (Rong, 1995) y la roca fosfórica para aplicación directa se utiliza solamente cerca de las minas en las áreas con suelos ácidos.

Las rocas fosfóricas para aplicación directa de China, Egipto, Islas Christmas, Israel, Jordania, Marruecos, Perú y Túnez continúan a ser producidas y utilizadas para la aplicación directa. Colombia, India, Sri Lanka y Venezuela también producen la roca fosfórica para aplicación directa. Las ventas de Carolina del Norte (Estados Unidos de América) alcanzaron en el pasado entre 250 000 y 300 000 toneladas anuales, sin embargo esta actividad comercial fue suspendida y no se halla actualmente disponible para la aplicación directa.



### RESERVAS Y RECURSOS MUNDIALES DE ROCA FOSFÓRICA

No existe un sistema universalmente aceptado para clasificar las reservas y los recursos de la roca fosfórica. Un sistema desarrollado en los Estados Unidos de América (U.S. Bureau of Mines & U.S. Geological Survey, 1981; U.S. Geological Survey, 1982) define las reservas como «recursos identificados de un mineral que puede ser extraído de manera rentable con la tecnología existente y bajo las condiciones económicas actuales» (Brobst y Pratt, 1973). Las reservas estimadas pueden ser descritas como la cantidad total de roca que puede ser minada en el yacimiento o como la cantidad de producto que puede extraerse. Muchos autores no hacen distinción entre las reservas y los recursos no económicos cuando declaran el tamaño de los yacimientos. En ese caso pueden existir diferencias sustanciales entre las estimaciones de las reservas y los recursos, según las diversas fuentes. Es prudente reconocer que tales discrepancias existen y que dichas cifras deben servir solamente como estimaciones.

La Figura 1 muestra un mapa de los depósitos de roca fosfórica que están actualmente en explotación, aquellos que han sido explotados en un pasado reciente y aquellos que parecen ser potencialmente económicos. Una compilación (Cuadro 3)

CUADRO 3

#### Reservas mundiales de roca fosfórica y reservas de base (en 1 000 toneladas)

	Reservas <sup>a</sup>	Reservas de base <sup>b</sup>
Estados Unidos de América	1 000 000	4 000 000
China	500 000	1 200 000
Israel	180 000	180 000
Jordania	900 000	1 700 000
Marruecos y Sahara Occidental	5 700 000	21 000 000
Senegal	150 000	1 000 000
Sudáfrica	1 500 000	2 500 000
Togo	30 000	60 000
Túnez	100 000	600 000
Federación Rusa	150 000	1 000 000
Otros países	1 200 000	4 000 000
<b>Total mundial</b>	<b>12 000 000</b>	<b>37 000 000</b>

a. Costo inferior a \$EE.UU. 40 /ton. El costo incluye capital, gastos operacionales, impuestos, derechos y un 15 por ciento de retorno sobre la inversión f.o.b. mina.

b. Criterios para la reserva de base establecidos por un grupo de trabajo conjunto del U.S. Bureau of Mines y U.S. Geological Survey.

Fuente: US Bureau of Mines, 2001.

CUADRO 4  
Recursos económicos mundiales identificados de fosfatos concentrados (millones de toneladas)

Continente y país	Reservas probadas	Reservas de base inferidas y reservas de base
<b>América del Norte</b>		
Estados Unidos de América	1 260	22 587
Canadá	37	37
México	208	2 416
Sub-total	1 505	25 040
<b>América del Sur</b>		
Brasil	551	558
Perú	428	1 353
Otros	120	211
Sub-total	1 099	2 122
<b>África</b>		
Argelia	250	435
Marruecos/Sahara occidental	2 100	62 575
Senegal	155	200
Sudáfrica	1 800	6 781
Túnez	70	1 021
Otros	82	1 216
Sub-total	4 457	72 228
<b>Asia</b>		
China	170	1 000
Iraq	296	296
Israel	70	449
Jordania	530	1 542
Otros	241	807
Sub-total	1 307	4 094
<b>Oceanía</b>		
Australia	340	850
Otros	51	51
Sub-total	391	901
<b>Europa</b>		
Ex-Unión soviética	6 500	8 000
Finlandia	-	46
Sub-total	6 500	8 046
<b>Total</b>	<b>15 259</b>	<b>112 431</b>

Fuente: Sheldon, 1987.

soluble en citrato de amonio neutro (Hammond y León, 1983) limita el número de los depósitos a ser considerados. Utilizando este criterio, los depósitos de Estados Unidos de América en Carolina del Norte, de Perú y de Túnez pueden ser considerados como aquellos que poseen los recursos mundiales más importantes de roca fosfórica con la mayor reactividad. Si bien existen un cierto número de pequeños depósitos o partes de depósitos que pueden contener rocas con una solubilidad relativamente alta, este análisis no considera estos depósitos debido a que no existen estimaciones de los recursos para muchos de ellos.

Utilizando los datos de las reservas de base inferidas y de las reservas de base (Cuadro 4) para Perú y Túnez y una cantidad de 730 millones de toneladas para los recursos de los depósitos de Carolina del Norte (Stowasser, 1991), explotables a un costo menor de \$ EE.UU. 60/tonelada, los recursos totales de roca fosfórica para

de los diez países mayores productores y de sus reservas de base muestra que estos países cuentan con cerca del 90 por ciento de las reservas mundiales de fosfato. Considerando las tasas actuales de extracción y las condiciones económicas de la década de 1990, más de la mitad de estos países habrá agotado sus reservas en menos de 20 años.

Sheldon (1987) clasificó las reservas y los recursos de fosfatos según los continentes y las regiones (Cuadro 4). A primera vista cada continente o región importante cuenta con «reservas» suficientes de fosfato, con la posible excepción de Oceanía (391 millones de toneladas). Sin embargo, a nivel regional, unos pocos países, o incluso un solo país pueden ser dominantes. En América del Norte, los Estados Unidos de América poseen 84 por ciento de las reservas. En Europa los países de la ex-Unión Soviética cuentan con el 99 por ciento de las reservas. En Africa, Argelia, Marruecos, Senegal, Sudáfrica y Túnez tienen el 98 por ciento de las reservas. Las reservas en América del Sur se hallan principalmente en Brasil y Perú (97 por ciento). En Asia, 88 por ciento de las reservas están en China, Jordania, Iraq e Israel. Australia posee 87 por ciento de las reservas de Oceanía.

Puesto que es difícil determinar valores seguros para la producción y el consumo actuales de la roca fosfórica para aplicación directa, también es difícil estimar los recursos mundiales de roca fosfórica más apropiados para la aplicación directa. El criterio de alta solubilidad según el cual una roca fosfórica para aplicación directa debe tener más de 5,9 por ciento de  $P_2O_5$

aplicación directa con más de 5,9 por ciento de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> soluble en el citrato de amonio neutro ascienden a unas 3100 millones de toneladas.

Utilizando los datos de Sheldon para el total de la reserva de base inferida de 112 431 millones de toneladas, las reservas mundiales de la roca fosfórica para aplicación directa de alta solubilidad representan cerca del 2,8 por ciento de los recursos mundiales totales.

Considerando el valor más conservador del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) para la reserva de base de los depósitos de Túnez estimados en 600 millones de toneladas (Cuadro 3), los estimados de Sheldon (1987) y Stowasser (1991) para los recursos de Perú y de Estados Unidos de América en Carolina del Norte y el total mundial de la reserva de base del Servicio Geológico de los Estados Unidos (37 000 millones de toneladas), las reservas mundiales de la roca fosfórica para aplicación directa de alta solubilidad ascienden a cerca del 7,2 por ciento de los recursos mundiales totales.

Si bien una consideración detallada de los pequeños depósitos o partes de los depósitos que pueden tener rocas fosfóricas de solubilidad relativamente alta o una redefinición del nivel seleccionado de solubilidad de la roca fosfórica podrían servir a incrementar la cantidad de los recursos mundiales potenciales de las rocas fosfóricas para aplicación directa más apropiadas, es evidente que sus recursos potenciales son limitados y que estos representan solamente una pequeña fracción del total de los recursos mundiales de roca fosfórica.

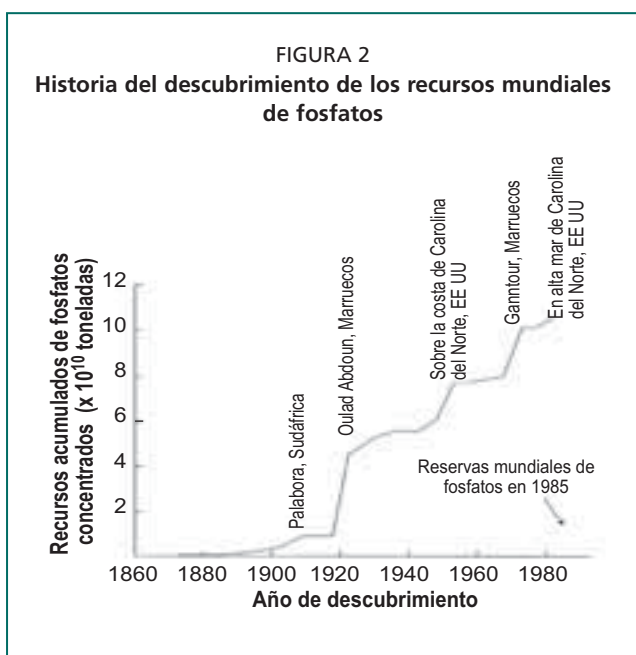
### TENDENCIAS FUTURAS EN LA PRODUCCIÓN MUNDIAL DE ROCA FOSFÓRICA

Entre los cuatro países actualmente mayores productores de roca fosfórica, Marruecos se halla en la posición más ventajosa ya que podría poseer más de la mitad de las reservas mundiales de fosfato. En los últimos 12 años, China ha aproximadamente duplicado su producción y Túnez ha aumentado su producción a cerca de 2 millones de toneladas. En 1999 dos nuevas minas de fosfatos se abrieron en Australia y Canadá. Los aumentos en la producción futura pueden también provenir de Australia, Iraq, Jordania y Sudáfrica.

En 1999 la producción en los países de la ex-Unión Soviética fue aproximadamente un tercio de los niveles de 1988. La recuperación después de los cambios políticos y de la caída económica de estos países ha sido lenta y puede continuar así en un futuro cercano. Una producción a los niveles actuales o decrecientes se espera para Argelia, Brasil, Naurú, India, Israel, Senegal, República Árabe Siria, Togo y Túnez. La producción podría provenir de las nuevas minas de Arabia Saudita, Guinea-Bissau, Mauritania y Perú.

Existe también potencial para descubrir nuevos depósitos. En los últimos 100 años los descubrimientos de los recursos de fosfatos (Figura 2) han sobrepasado las necesidades del aumento del consumo (Sheldon, 1987).

Una fuente futura de producción de los fosfatos es la explotación de los depósitos marinos. Depósitos de este tipo ocurren a lo largo de la costa sudeste de los Estados Unidos de América, en la placa continental de Perú-Chile, en alta mar de las costas de Namibia, sobre el Chatam



Fuente: Sheldon, 1987.

Rise en alta mar de Nueva Zelandia, en alta mar de las costas de Baja California, México y en alta mar del delta del río Congo. Ninguno de estos depósitos marinos es actualmente explotado y probablemente no serán explotados mientras existan reservas suficientes en tierra firme.

## Capítulo 3

# Caracterización de las rocas fosfóricas

Los estudios de caracterización de las muestras de rocas fosfóricas deben proveer información sobre: (i) la composición de la apatita, de otros minerales fosfatados y de los minerales ganga, (ii) las cantidades relativas de las especies minerales presentes (estimadas) y, (iii) combinar esta información con un análisis químico completo para determinar la distribución de los elementos químicos dentro de los compuestos minerales.

En base a dicha evaluación es posible estimar el potencial de beneficio, sugerir posibles procesos de beneficio y realizar una evaluación preliminar de la capacidad de las rocas fosfóricas para los diversos procesos de producción de fertilizantes y/o su idoneidad para la aplicación directa.

### MINERALOGÍA DE LAS ROCAS FOSFÓRICAS

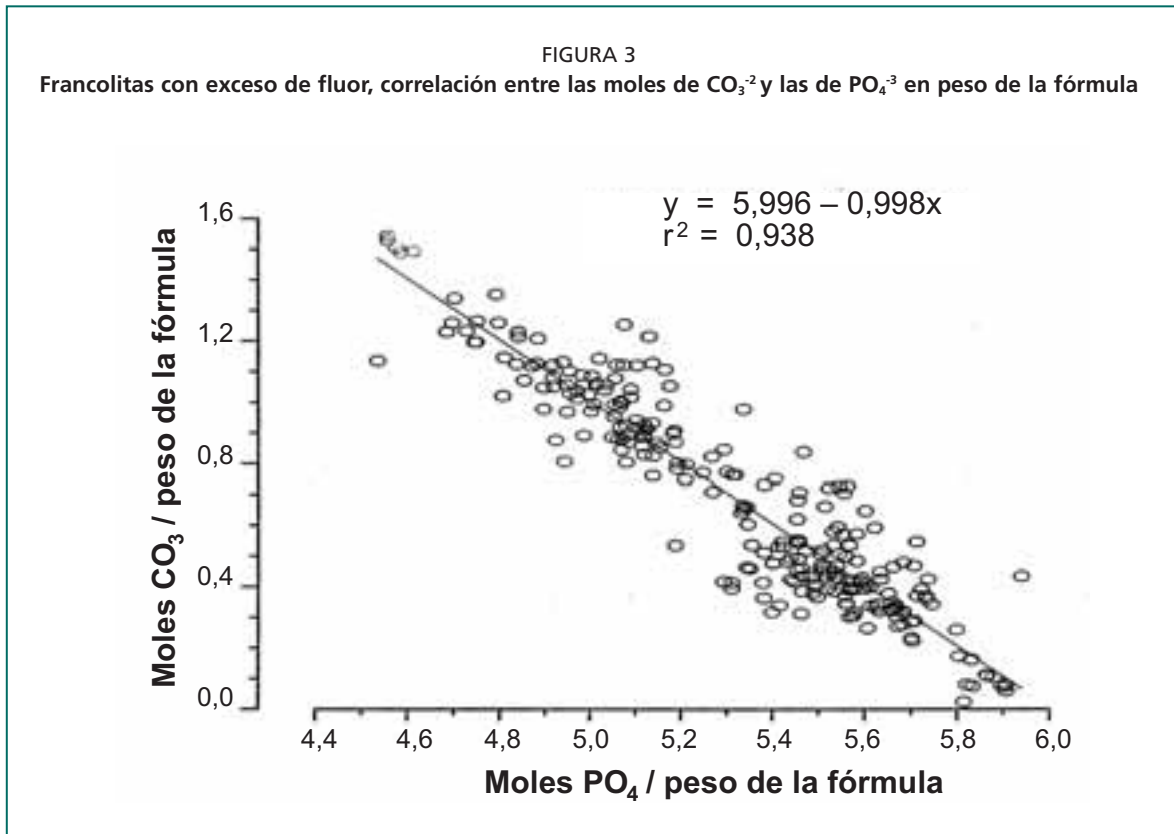
#### Apatitas sedimentarias

La mayoría de los depósitos sedimentarios contienen variedades de carbonato-fluorapatita que son agrupadas bajo el nombre colectivo de francolitas (McConnell, 1938). Para establecer una serie de relaciones sistemáticas entre las francolitas, diversos autores (McClellan y Lehr, 1969; McClellan, 1980; McClellan y Van Kauwenbergh, 1990a) han utilizado la difracción de rayos X, el análisis químico y los métodos estadísticos para demostrar que los contenidos de calcio, sodio, magnesio, fósforo, dióxido de carbono y fluor pueden describir de manera adecuada la mayoría de las francolitas.

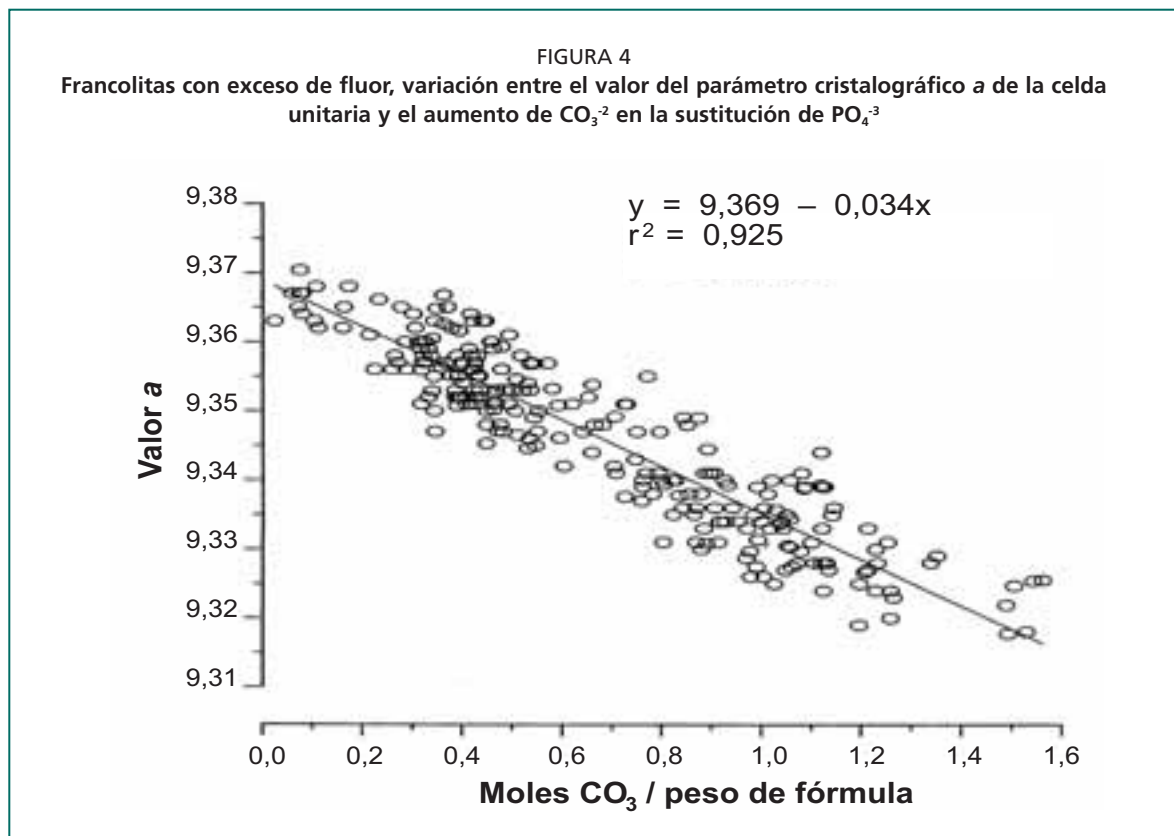
Un hecho sumamente importante es que el carbonato sustituye al fosfato en una relación 1:1 (Figura 3), y la cantidad máxima de sustitución es de 6 a 7 por ciento de CO<sub>2</sub> en peso. Las sustituciones de cationes y aniones compensan los desbalances de la carga neta. La incorporación de CO<sub>2</sub> en la estructura de la francolita está acompañada por un aumento del contenido de fluor. En las francolitas la dimensión del parámetro cristalográfico  $\alpha$  (valor  $\alpha$ ) disminuye desde 9 369 +/- 0,001 Å hasta casi 9 320 +/- 0,001 Å con la sustitución máxima de carbonato (Figura 4). El índice de refracción también disminuye sistemáticamente con el aumento de la sustitución del fosfato por el carbonato.

Las rocas fosfóricas sedimentarias de tipo guano halladas en islas y grutas poseen a menudo carbonato-apatitas con un contenido de fluor más bajo que la fluorapatita estequiométrica y pueden tener cantidades importantes de hidroxilos en sus estructuras. Si bien algunas de estas carbonato-apatitas corresponden a la definición de la francolita (contenido de CO<sub>2</sub> apreciable y con más de uno por ciento de fluor) (McConnell, 1938), poseen propiedades cristalográficas, químicas y físicas que difieren sustancialmente de aquellas francolitas que poseen exceso de fluor (McClellan y Van Kauwenbergh, 1990b; Van Kauwenbergh y McClellan, 1990a; Van Kauwenbergh, 1995).

Algunas carbonato-apatitas no corresponden exactamente ni a las francolitas con exceso de fluor ni a las francolitas de las series de la hidroxil-apatita, fluor-apatita y carbonato-apatita y probablemente pertenezcan a una clase intermedia. Las rocas fosfóricas de los depósitos de Sechura (Perú) y de Mejillones (Chile) entran dentro de esta categoría. Las carbonato-apatitas en estas rocas tienen una dimensión del parámetro  $a$  que caen claramente en el rango de las series de francolitas (9 320-9 370 Å).

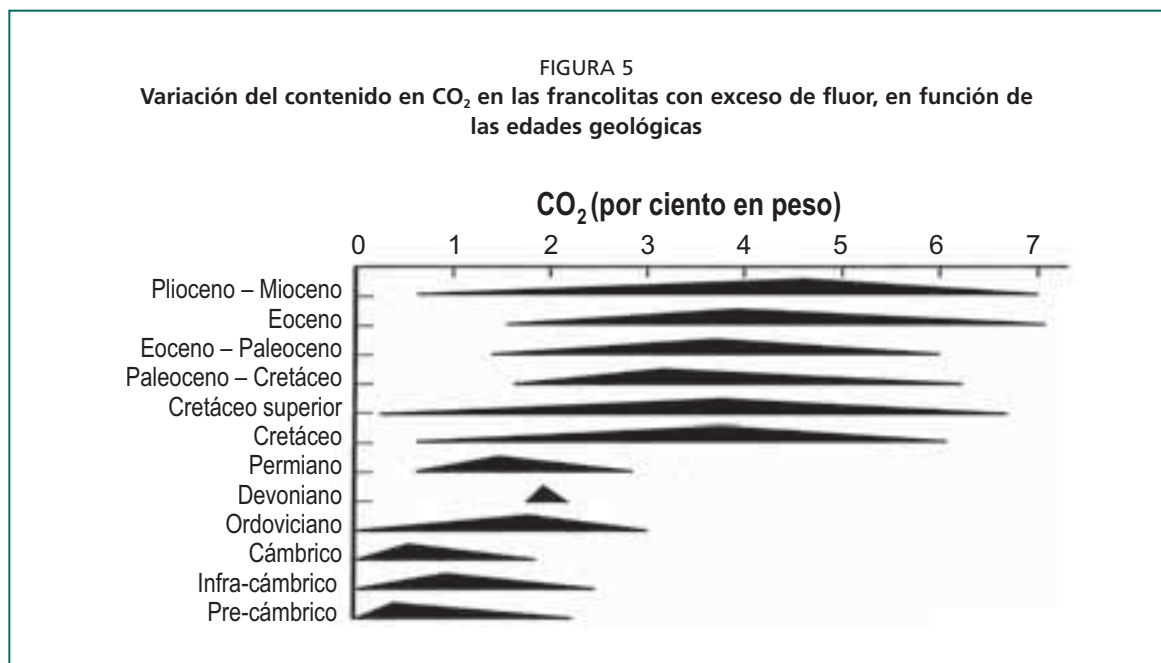


Fuente: McClellan y Van Kauwenbergh, 1990a.



Fuente: McClellan y Van Kauwenbergh, 1990a.





Sin embargo, las muestras de estos depósitos exhiben contenidos de carbonatos y reactividades químicas más elevados que aquellos obtenidos por los cálculos basados en los modelos de francolitas con exceso de fluor.

Las francolitas son metaestables con respecto a la fluorapatita y pueden ser alteradas sistemáticamente mediante los efectos combinados de la meteorización, del metamorfismo y del tiempo (McClellan, 1980). Las rocas fosfóricas de un mismo depósito sedimentario pueden contener apatitas con propiedades ampliamente diferentes debido a las condiciones geológicas de su formación y sus alteraciones posteriores (Van Kauwenbergh y McClellan, 1990b; McClellan y Van Kauwenbergh, 1991). Las rocas sedimentarias más antiguas generalmente contienen francolitas con un grado limitado de sustitución de carbonatos mientras que las rocas fosfóricas sedimentarias más recientes pueden tener composiciones que comprenden el modelo de la francolita (Figura 5).

### Apatitas ígneas

La principal apatita cristalina de las fuentes ígneas puede pertenecer a las variedades de la fluor-apatita, hidroxí-apatita o cloro-apatita y las apatitas puras de estas variedades contienen ligeramente más de 42 por ciento de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Existe una serie continua entre los miembros finales de la fluor-apatita y la hidroxí-apatita.

### Otros minerales en las rocas fosfóricas

El análisis del P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total de un mineral potencial no es un criterio seguro para estimar el contenido en apatita y evaluar un depósito de fosfatos. Los minerales fosfatados secundarios más comunes, resultantes de la meteorización son probablemente los miembros de la serie de la crandalita. La wavelita es un fosfato de aluminio también comúnmente formado por la meteorización. Los minerales accesorios no fosfatados más comunes asociados con las rocas fosfóricas son el cuarzo, las arcillas y los carbonatos (dolomita y calcita). Las rocas fosfóricas cementadas con carbonatos deben ser particularmente mencionadas debido a su abundancia de su ocurrencia. El cuarzo puede ocurrir en forma de granos residuales o como variedades microcristalinas. Un cemento silíceo puede ser particularmente difícil de detectar en las muestras utilizando

la microscopía óptica debido a su naturaleza anisotrópica y su apariencia similar a la francolita microcristalina.

Otros silicatos encontrados en las rocas fosfóricas sedimentarias pueden incluir los feldespatos y las micas (biotita y muscovita). Los minerales de arcilla encontrados en las rocas fosfóricas sedimentarias incluyen la illita, la caolinita, las esmectitas y la paligorskita/sepiolita. Las zeolitas, incluyendo la clinoptilolita y la heulandita, se encuentran ocasionalmente en las rocas fosfóricas.

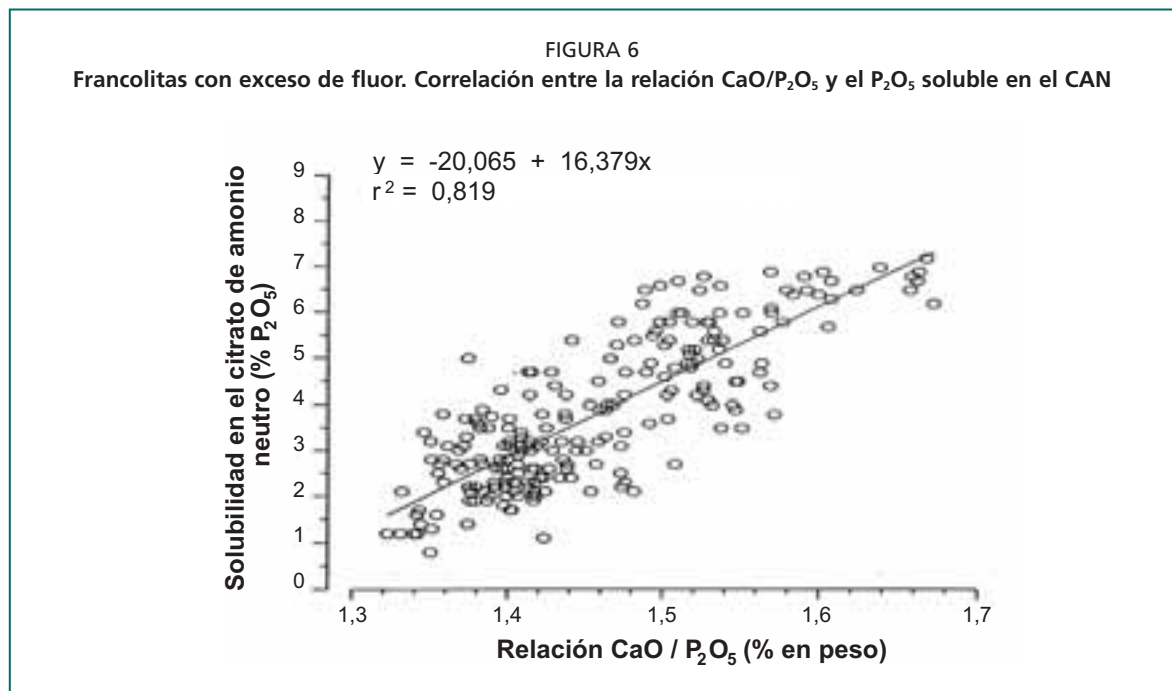
Los minerales frecuentemente asociados con las apatitas ígneas incluyen la nefelina, los feldespatos alcalinos, las micas, los piroxenos y los anfíboles. La calcita, la dolomita y la magnetita son minerales comúnmente asociados con los depósitos de carbonato-apatita. La meteorización puede eliminar los carbonatos y algunos silicatos dejando los minerales resistentes tales como la apatita, la magnetita, el pirocloro y el zirconio en el residuo sobre el depósito.

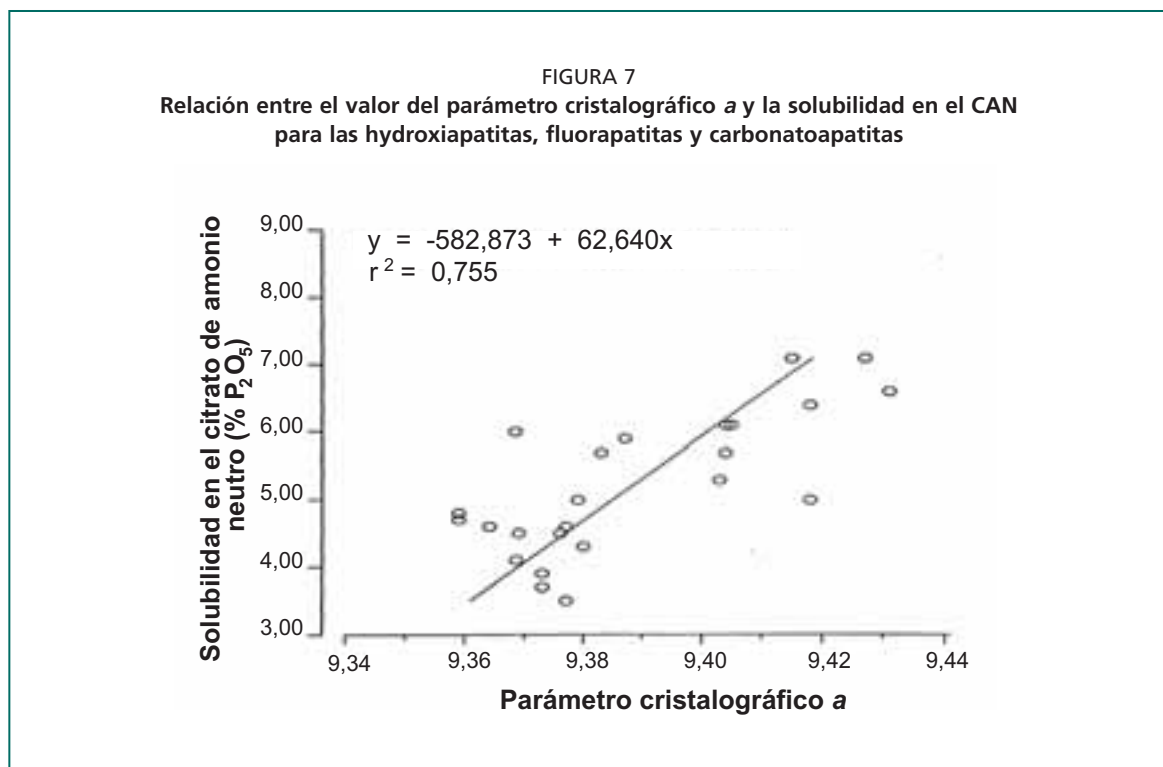
## PRUEBAS DE SOLUBILIDAD DE LAS ROCAS FOSFÓRICAS

### Solubilidad de la apatita

Las tres soluciones comúnmente empleadas para medir la solubilidad (reactividad) de una roca fosfórica para aplicación directa son el citrato de amonio neutro, el ácido cítrico al 2 por ciento y el ácido fórmico al 2 por ciento. Los métodos empleados para medir la solubilidad de la roca fosfórica provienen de los procedimientos empleados para analizar los fertilizantes fosfatados convencionales solubles en el agua y el citrato. A menos de seguir estrictamente los pasos de los procedimientos estándar, los valores de solubilidad obtenidos por diversos investigadores empleando los mismos métodos sobre las mismas fuentes de roca fosfórica pueden presentar discrepancias considerables (Hammond *et al.*, 1986b).

La solubilidad en el citrato de amonio neutro de las francolitas con una cantidad máxima conocida de la sustitución de carbonato ( $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5 = 1,67$ ) es cerca de 7 por ciento  $\text{P}_2\text{O}_5$  (Figura 6). Este valor se reduce al disminuir la sustitución de carbonato a cerca de 1-2 por ciento  $\text{P}_2\text{O}_5$  para las francolitas sedimentarias con muy baja sustitución ( $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5 = 1,33$ ). Las rocas fosfóricas que contienen carbonato-apatitas con un bajo





Fuente: Van Kauwenbergh, 1995.

contenido de fluor y una sustitución de OH<sup>-</sup> pueden tener solubilidades en los diversos medios de extracción tan altas como las francolitas con un alto grado de sustitución (Figura 7). Las solubilidades en el citrato de amonio neutro de las apatitas ígneas son generalmente 1-2 por ciento de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> o casi las mismas que las francolitas sedimentarias con bajo grado de la sustitución de carbonato.

El Cuadro 5 muestra los datos de solubilidad en el citrato de amonio neutro, en el ácido cítrico al 2 por ciento y en el ácido fórmico al 2 por ciento para algunas rocas fosfóricas seleccionadas, en orden decreciente de la sustitución de carbonato. Las dos rocas fosfóricas que probablemente muestran las solubilidades en el ácido cítrico neutro más uniformemente altas son aquellas de Carolina del Norte (Estados Unidos de América) y de Gafsa (Túnez). Las rocas fosfóricas de Florida Central y de Tennessee

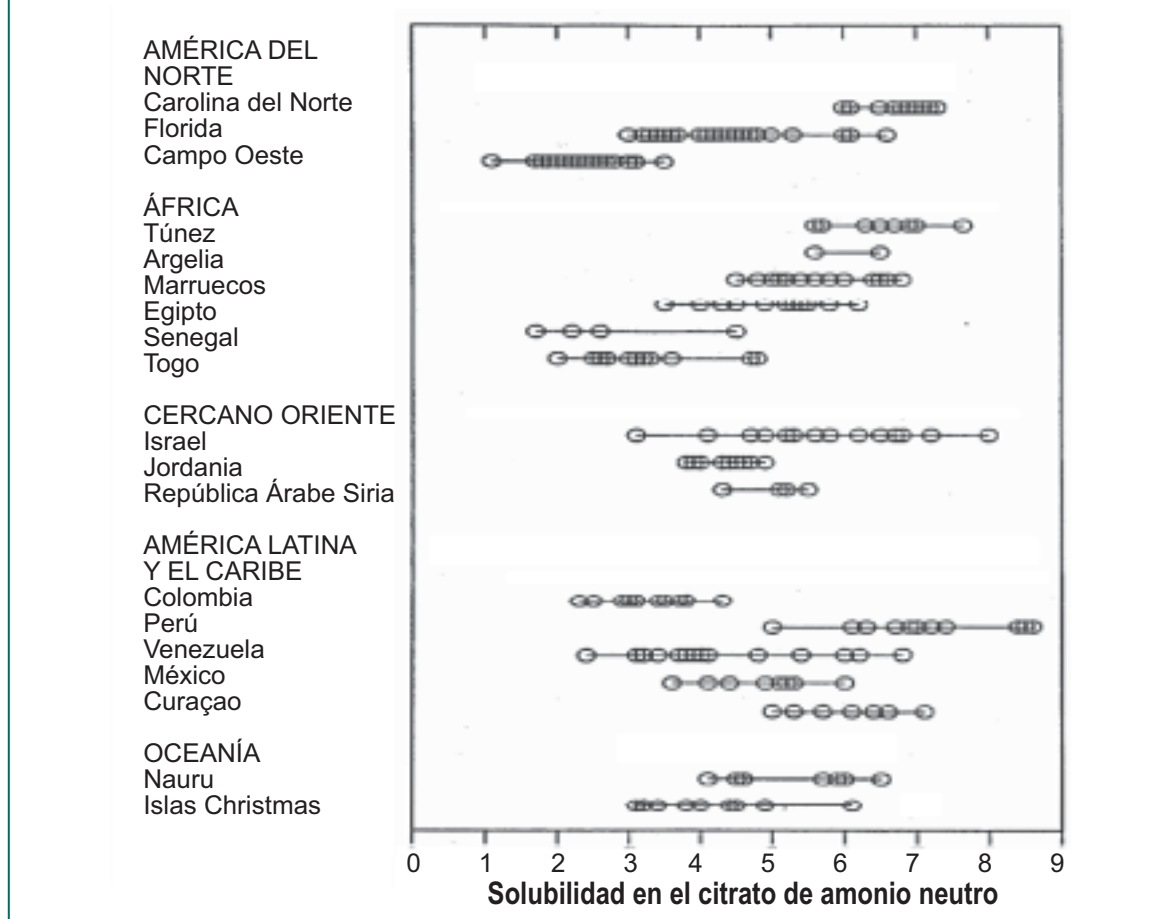
**CUADRO 5**  
**Datos de solubilidad en muestras de rocas fosfóricas seleccionadas**

Muestra	Tipo	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> total	Apatita <sup>a</sup> Sustitución CO <sub>3</sub>	Solubilidad <sup>b</sup> (% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )			
				Citrato de amonio neutro		Ácido cítrico 2 %	Ácido fórmico 2 %
				1 <sup>ra</sup> Extracción	2 <sup>da</sup> Extracción		
				(% peso)			
Carolina del Norte (EE.UU.A.)	Sedimentaria	29,8	6,4	7,1	6,6	15,8	25,7
Gafsa (Túnez)	Sedimentaria	29,2	5,8	6,6	6,8	11,9	18,6
Florida Central (EE.UU.A.)	Sedimentaria	32,5	3,2	3,0	3,2	8,5	8,2
Tennessee (EE.UU.A.)	Sedimentaria	30,0	1,6	2,5	2,7	8,7	6,9
Araxa (Brasil)	Ígnea	37,1	0	1,7	1,7	3,5	3,9

a. Basada en modelos estadísticos desarrollados en el IFDC.

b. Todas las muestras fueron molidas a malla 200 Tyler (75 µm) en condiciones similares.

FIGURA 8  
Solubilidad en el CAN de las rocas fosfóricas sedimentarias de diversos países



Fuente: adaptado de Van Kauwenbergh, 1995.

(ambas de los Estados Unidos de América) poseen menos sustitución de carbonatos y también más bajas solubilidades. La roca fosfórica ígnea de Araxa (Brasil), sin prácticamente sustitución de carbonato, exhibe la más baja solubilidad en este grupo de muestras.

Por otro lado los rangos medidos (máximo y mínimo) de las solubilidades en el ácido cítrico neutro de las rocas fosfóricas de diversos países presentan una gran variabilidad (Figura 8). Las impurezas tales como la calcita, la dolomita y el yeso pueden causar interferencias en las mediciones de la solubilidad (Axelrod y Gredinger, 1979). Por lo tanto, será necesario eliminar los carbonatos que interfieren con las mediciones de la solubilidad. Es posible eliminar los carbonatos utilizando la solución de Silverman (solución de citrato triamónico, pH 8,1) (Silverman et al., 1952). Los valores de  $P_2O_5$  soluble en el ácido cítrico neutro pueden aumentar sustancialmente después de la eliminación de los carbonatos. Todos los valores presentados en este capítulo fueron obtenidos usando muestras después que los carbonatos fueron eliminados o muestras que no contenían carbonatos detectables.

El área específica de las partículas de fosfato tiene un efecto marcado sobre la solubilidad aparente. Las partículas de los fosfatos sedimentarios que contienen francolitas con un alto grado de sustitución están compuestas de agregados microcristalinos. En las rocas fosfóricas sedimentarias, la superficie externa de las partículas de fosfato contribuye

solamente una pequeña fracción del área específica. El área específica incluyendo la porosidad interna de las rocas sedimentarias puede ser más de 20 veces superior al área específica de las rocas ígneas (magmáticas), que están compuestas de cristales compactos de apatita. Estudios realizados por la Autoridad del Valle de Tennessee en los Estados Unidos de América (Tennessee Valley Authority) (Lehr y McClellan, 1972) mencionan que las rocas fosfóricas con las más altas solubilidades en el citrato tienen a menudo las más altas áreas específicas.

La molienda proporciona «nuevas» superficies de las partículas y aumenta el área geométrica de la superficie incrementando la solubilidad. Estudios realizados por el Centro Internacional para la Fertilidad del Suelo y el Desarrollo Agrícola (IFDC) con dos rocas fosfóricas de alta solubilidad en el ácido cítrico neutro indicaron que la molienda desde más de malla 200 Tyler (75  $\mu\text{m}$ ) hasta un 100 por ciento de malla menos 200 incrementó el área específica de 40 a 50 por ciento. Las solubilidades de  $\text{P}_2\text{O}_5$  en el ácido cítrico neutro de estas rocas fosfóricas y de una tercera roca fosfórica aumentaron desde cerca de 60 hasta 120 por ciento con la molienda a malla menos 200. Sin embargo, informes de experimentaciones anteriores (Rogers et al., 1953; Cooke, 1956; Khasawneh y Doll, 1978) concluyeron que, independientemente del aumento en la solubilidad de la roca fosfórica, una molienda a un tamaño de partículas de menos de malla 100 raramente se justifica para el uso agronómico.

### CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS FOSFÓRICAS BASADA EN LA SOLUBILIDAD

No existe un sistema simple de amplia aceptación para clasificar las rocas fosfóricas según las mediciones de la solubilidad y agruparlas para aplicación directa. Diamond (1979) propuso un sistema de clasificación de tres categorías (baja, media y alta reactividad) según las solubilidades en el ácido cítrico neutro, el ácido cítrico al 2 por ciento y el ácido fórmico al 2 por ciento (Cuadro 6). El sistema estaba basado en los datos del IFDC sobre la eficiencia relativa de los medios de extracción y los resultados de una gran variedad de experimentos de laboratorio y ensayos de campo.

Hammond y León (1983) propusieron un sistema con cuatro clases de solubilidad (alta, media, baja y muy baja) basado en la efectividad agronómica relativa y el  $\text{P}_2\text{O}_5$  soluble en el ácido cítrico neutro (Cuadro 7). Este estudio trata de una comparación relativa de las rocas fosfóricas de diversos orígenes: sedimentarias, ígneas y metamórficas, basado en un experimento en invernadero utilizando el pasto Guinea (*Panicum maximum*) en un suelo ácido. Los resultados y la información adicional fueron analizados con métodos estadísticos demostrando que las clasificaciones de baja y muy baja reactividad correspondían a las francolitas sedimentarias con muy baja sustitución de carbonato y a las rocas fosfóricas ígneas (León et al., 1986). Los valores de efectividad agronómica relativa dependen no sólo de las propiedades intrínsecas de la roca fosfórica (solubilidad en el ácido cítrico neutro) sino también de las propiedades del suelo y de las especies y variedades (Khasawneh y Doll, 1978).

El contenido de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (grado) y la solubilidad de una roca fosfórica

CUADRO 6  
Clasificación de las rocas fosfóricas para la aplicación directa según su solubilidad y respuesta inicial esperada

Potencial de la roca	Solubilidad (% $\text{P}_2\text{O}_5$ )		
	Citrato de amonio neutro	Ácido cítrico	Ácido fórmico
Alto	>5,4	>9,4	>13,0
Medio	3,2-4,5	6,7-8,4	7,0-10,8
Bajo	<2,7	<6,0	<5,8

Fuente: Diamond, 1979

CUADRO 7  
Sistema de clasificación de algunas rocas fosfóricas de América del Sur según su solubilidad y eficiencia agronómica relativa

$\text{P}_2\text{O}_5$ Soluble en CAN (% $\text{P}_2\text{O}_5$ )	EAR <sup>1</sup> (%)	Clase de Solubilidad
>5,9	>90	Alta
3,4-5,9	90-70	Media
1,1-3,4	70-30	Baja
<1,1	<30	Muy baja

<sup>1</sup> EAR = [(rendimiento tratamiento-RF) - (rendimiento control)] / [(rendimiento tratamiento-SFT) - (rendimiento control)] x 100.

Fuente: Hammond y León, 1983.

constituyen la mercadería que el consumidor compra. Sin embargo, el grado puede no ser crítico en las evaluaciones de la solubilidad en el laboratorio. Lehr y McClellan (1972) demostraron que el ácido cítrico neutro solubilizó una cantidad relativamente constante de  $P_2O_5$  en las extracciones sucesivas de la misma muestra. Mientras que el  $P_2O_5$  extraído permanecía relativamente constante, el contenido total de  $P_2O_5$  de la muestra disminuyó. Una cantidad bastante constante de  $P_2O_5$  soluble en el ácido cítrico neutro fue obtenida para todas las muestras que contenían por lo menos 50 por ciento de la roca fosfórica (o cerca del 20 por ciento de  $P_2O_5$ ). La confusión en la interpretación de los datos de solubilidad comienza cuando el  $P_2O_5$  extraído es expresado como porcentaje del  $P_2O_5$  total. Por ejemplo una roca con 30 por ciento de  $P_2O_5$  con un valor de extracción del ácido cítrico neutro de 7 por ciento de  $P_2O_5$  puede ser expresado como 23 por ciento del  $P_2O_5$  total. Una muestra de la misma roca (y la misma apatita) puede ser diluida para obtener un 20 por ciento de  $P_2O_5$ . Para el valor de extracción del ácido cítrico neutro de 7 por ciento de  $P_2O_5$ , el  $P_2O_5$  soluble en el ácido cítrico neutro expresado como porcentaje del  $P_2O_5$  total sería de 35 por ciento. Esta cifra es más alta y podría parecer mejor a algún interesado. Sin embargo, la roca fosfórica no será más soluble y el consumidor comprará y transportará menos nutrientes y más minerales ganga.

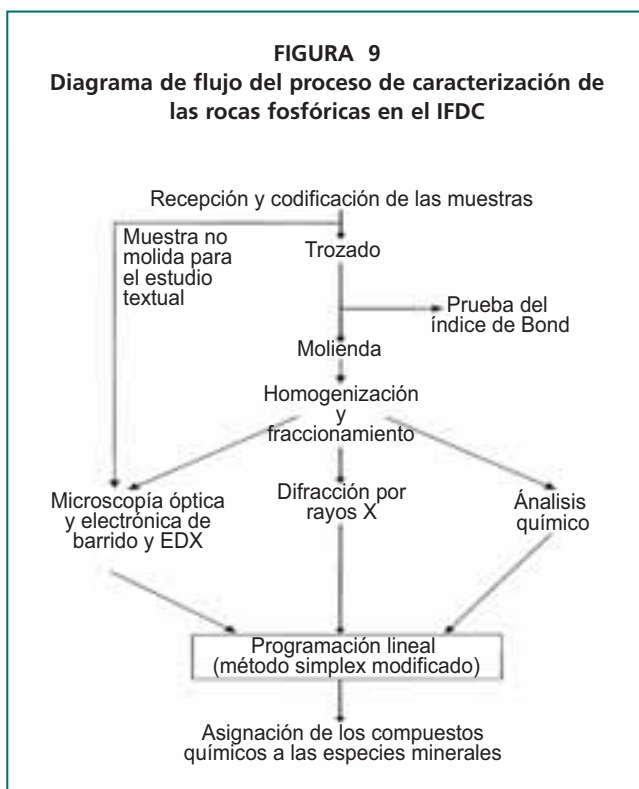
### MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN

El diagrama de flujo de la Figura 9 muestra una secuencia «ideal» de los pasos seguidos en el IFDC para una caracterización detallada de un depósito de roca fosfórica. Este esquema está basado en la experiencia y puede ser modificado para adaptarse a las muestras o las situaciones específicas.

Cuando la muestra consiste de fragmentos de roca, porciones de las muestras no molidas son procesadas para preparar secciones finas para la microscopía óptica y los estudios texturales. Los fragmentos de roca restantes son fragmentados y molidos para obtener un producto relativamente fino. Estos pueden ser homogenizados, fraccionados y muestreados (cerca de menos de 0,63 cm). Las muestras sueltas pueden ser tamizadas para determinar su distribución de tamaño de partículas y cada una de las fracciones puede ser analizada químicamente.

Los métodos microscópicos incluyen la microscopía óptica y la microscopía electrónica de barrido. La microscopía óptica es utilizada para identificar las especies minerales, especificar los tipos de partículas minerales, estudiar la textura de las rocas fosfóricas consolidadas y estimar el porcentaje de los diversos minerales así como el grado de liberación y tamaño de los granos de los varios componentes. Las muestras pueden ser examinadas como granos montados o como secciones finas.

La textura de las rocas fosfóricas puede ser muy importante. Las rocas consolidadas necesitan ser fragmentadas y molidas a fin de liberar las partículas de fosfatos. Normalmente una roca será molida hasta cerca la mitad del diámetro de grano de la partícula mineral de interés o del mineral ganga primario a fin de obtener la liberación (80 por ciento de



partículas monominerales) necesaria para el beneficio. El análisis de la imagen por ordenadores puede ser útil para estimar los tamaños de los granos de fosfato o de los minerales ganga. Mientras que los granos de fosfato y de los minerales ganga pueden encontrarse en algunas rocas como partículas separadas, ciertas rocas fosfóricas pueden tener cantidades importantes de los minerales ganga encerrados dentro de las partículas de fosfato.

Las relaciones cemento-partícula son también importantes. Si los granos de fosfato se separan limpiamente del cemento, será posible hacer una separación altamente eficiente. Si los bordes entre los granos de fosfato y los del cemento están entremezclados, o sea bloqueados, la separación será difícil.

Cuando no es posible identificar los minerales por la microscopía óptica y/o los métodos de difracción de rayos X, las técnicas de microscopía electrónica de barrido y los análisis por espectrometría de la energía dispersa de rayos X pueden ser muy útiles para determinar las relaciones entre los granos de fosfato y de cemento y para determinar si el cemento se separa limpiamente de los granos. Estas técnicas de microscopía de barrido y análisis de espectrometría de la energía dispersa de los rayos X, proporcionan amplificaciones mucho mayores y permiten un examen detallado de las texturas del fosfato y de las superficies de los minerales ganga.

La difracción de rayos X es utilizada para identificar los minerales, para estimar cualitativamente sus concentraciones y para determinar las dimensiones de la celda unitaria de la apatita. Cada mineral tiene un difractograma o patrón único de difracción de rayos X compuesto de una serie de picos. Los programas de búsqueda por ordenadores facilitan considerablemente las complejidades de la identificación de las especies minerales en mezclas complejas.

Se pueden necesitar técnicas especiales para la identificación de los minerales de arcilla incluyendo la separación por tamaño de partículas y su concentración. Las muestras pueden ser secadas al aire, tratadas con vapores orgánicos y/o sometidas a un tratamiento térmico para diferenciar los minerales de arcilla.

Los datos de difracción de rayos X de la apatita y de un estándar interno pueden ser procesados utilizando técnicas por ordenadores de los cuadrados mínimos para determinar las dimensiones a y c de las celdas unitarias. Un problema frecuentemente encontrado en el análisis de los datos es la presencia de picos sobrepuestos y de interferencia. Los fosfatos de hierro y aluminio y los carbonatos (calcita y dolomita) tienen picos que se superponen con los picos de la apatita. Estos picos pueden ser eliminados durante el procesamiento de los datos. Las técnicas de extracción química pueden ser también utilizadas para eliminar los carbonatos antes del análisis de difracción de rayos X.

Los análisis químicos de la mayoría de las rocas fosfóricas incluyen normalmente CaO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, MnO, MgO, CO<sub>2</sub>, S, C orgánico, agua libre y pérdidas por calor. Hay muestras estándar disponibles comercialmente para calibrar los métodos analíticos.

Las identificaciones de los minerales realizadas por los métodos de difracción de rayos X, de microscopía electrónica de barrido, análisis por espectrometría de dispersión de energía de rayos X y la microscopía óptica así como los análisis químicos son comparados utilizando diversos programas de cómputo desarrollados en el IFDC. Estas técnicas emplean un método de cálculo de balance de masas químico/mineral, que resulta en un análisis modal aproximado (Figura 10).

La caracterización de las fuentes de roca fosfórica, principalmente la composición química, la reactividad y el tamaño de las partículas, es un paso esencial para evaluar su idoneidad para la aplicación directa, en particular para los fines de comparación en los ensayos agronómicos (Chien y Hammond, 1978; Truong *et al.*, 1978; Hammond *et al.*, 1986b). En el marco de un proyecto FAO/OIEA de investigación coordinada, fue evaluada la eficiencia agronómica de las fuentes de roca fosfórica de diferentes

FIGURA 10  
Análisis modal aproximado de la muestra de fosforita número 1

Compuestos Principales	Total	Calcita	Dolomita	Francolita	Pirita	Cuarzo	No determinado
CaO	48,30	0,94	0,25	47,10			
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	30,42			30,42			0,00
F	3,78			3,78			0,00
Cl	0,00						0,00
SiO <sub>2</sub>	1,79					1,79	0,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,38						0,38
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,53				0,53		0,00
Na <sub>2</sub> O	0,90			0,82			0,08
K <sub>2</sub> O	0,10						0,10
MnO	0,00						0,00
MgO	0,47		0,06	0,41			
CO <sub>2</sub>	5,83	0,74	0,26	4,28			0,55
S	1,10				0,43		0,67
Total	93,61	1,69	0,57	86,71	0,96	1,79	1,79
-O=F	1,59			1,71			
-O=Cl	0,00						
Total	92,01	1,69	0,57	85,00	0,96	1,79	
Volátiles							
LOI	11,38						
H <sub>2</sub> O	1,31						
C orgánico	1,38						

Francolita: A = 9,326999  
 Índice teórico de refracción (N25) = 1,604  
 Índice teórico de solubilidad absoluta en el citrato = 17,7%  
 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> soluble en el citrato pronosticado AOAC = 6,3%  
 CaO/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Francolita = 1,55  
 CaO/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, RF total = 1,59  
 Relación CaO/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, (calcita extraída) = 1,56  
 Relación R<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = 0,03  
 Relación (R<sub>2</sub>O<sub>3</sub> +MgO)/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = 0,05

depósitos del mundo entero bajo diferentes condiciones de suelo, clima y cultivos (IAEA, 2002). Además de los estudios de caracterización individual realizados por los investigadores participantes, una caracterización estandarizada completa de 28 muestras de rocas fosfóricas provenientes de 15 países, incluyendo la composición mineralógica y cristalográfica, química y física así como los análisis de reactividad fue realizada en laboratorios especializados. Esta caracterización estandarizada fue necesaria para obtener informaciones directas y comparables sobre la conveniencia de las rocas fosfóricas estudiadas para la aplicación directa y para interpretar mejor los resultados de la evaluación agronómica, incluyendo la creación de un banco de datos para probar modelos y desarrollar un sistema de apoyo a la toma de decisiones. Truong y Zapata (2002) resumieron la información sobre los métodos utilizados y los resultados obtenidos. También proporcionaron lineamientos para la caracterización de las rocas fosfóricas para aplicación directa.



## Capítulo 4

# Evaluación de las rocas fosfóricas para aplicación directa

En el Capítulo 3 se ha descrito la caracterización de los materiales de roca fosfórica para aplicación directa. Dependiendo de su origen e historia geológica, las rocas fosfóricas presentan una gran variabilidad en sus propiedades intrínsecas, especialmente en su grado, los requerimientos de beneficio y la reactividad de la apatita. Estas informaciones proveen la primera oportunidad para evaluar la idoneidad de las rocas fosfóricas para aplicación directa. En el caso de su utilización en agricultura, las rocas fosfóricas aplicadas al suelo sufren una serie de transformaciones químicas y biológicas que gobiernan su disolución y la disponibilidad del fósforo disuelto para las plantas.

Este Capítulo revisa las metodologías para evaluar las rocas fosfóricas para aplicación directa en la agricultura. Estas incluyen las pruebas de solubilidad utilizando reactivos convencionales, los estudios de incubación en suelo sin plantas, los experimentos en macetas utilizando una planta indicadora bajo condiciones controladas y los experimentos de campo integrando los factores de medio ambiente, los sistemas de cultivo y las prácticas agrícolas de manejo así como sus interacciones. Este Capítulo ilustra estos métodos utilizando ejemplos seleccionados de los estudios con las rocas fosfóricas del Africa Occidental (Truong *et al.*, 1978). La información ha sido obtenida utilizando las rocas fosfóricas de Taiba (Senegal) y de Hahotoe (Togo), que son explotadas en gran escala para la exportación. Otras rocas fosfóricas incluyen las de Arli y de Kodjari (Burkina Faso), la de Tahoua (Níger) y la de Tilemsi (Malí), que son extraídas en pequeña escala para uso local. La roca fosfórica de Gafsa (Túnez) fue utilizada como referencia debido a su alta reactividad.

El interés en las rocas fosfóricas africanas, en particular aquellas del África subsahariana radica en una serie de consideraciones. En primer lugar, existe una situación paradójica ya que África figura en primer lugar con 28,5 por ciento de la producción mundial de roca fosfórica pero posee el consumo más bajo de fosfatos con 2,8 por ciento del consumo mundial (FAO, 1999). En segundo lugar, si bien los recursos de rocas fosfóricas de África son considerables en cantidad y diversidad, son poco explotados (McClellan y Notholt, 1986; Baudet *et al.*, 1986). Se pueden encontrar todos los tipos de rocas fosfóricas. Existen depósitos de rocas fosfóricas de origen ígneo en Sudáfrica, Zambia y Zimbabwe; estas rocas fosfóricas con cristales naturalmente grandes son completamente no reactivas y no apropiadas para la aplicación directa (Khasawneh y Doll, 1978). Depósitos de tipo guano se encuentran en Madagascar y Namibia (Truong *et al.*, 1982). Estos depósitos han sido formados recientemente sobre depósitos de coral y son muy blandos y prácticamente equivalentes a los fosfatos solubles en agua. Finalmente hay rocas fosfóricas sedimentarias que han sido depositadas progresivamente durante el transcurso de los períodos geológicos y están débilmente consolidadas. Poseen partículas microcristalinas con grandes áreas específicas y presentan una amplia diversidad en su composición química y reactividad. Estos depósitos representan el 80 por ciento del total de las reservas mundiales. Se extienden desde el norte hacia el oeste y el centro de África y son los más apropiados para aplicación directa en la agricultura.

Para obtener informaciones detalladas recientes, el lector puede referirse al proyecto internacional FAO/OIEA de investigación coordinada (IAEA, 2002). Este proyecto ha ejecutado todos los tipos de estudios antes mencionados para evaluar la eficiencia

agronómica de las fuentes de rocas fosfóricas de varios depósitos de todo el mundo bajo un amplio rango de condiciones de suelo, clima, cultivos y métodos de manejo.

### PRUEBAS DE SOLUBILIDAD DE LAS ROCAS FOSFÓRICAS

Las pruebas de solubilidad de las rocas fosfóricas utilizando métodos de extracción química son empíricas. Ofrecen un método simple y rápido para clasificar y luego seleccionar las rocas fosfóricas según su efectividad potencial y no pueden ser utilizadas para evaluar la cantidad de P disponible para las plantas debido a que la eficiencia agronómica real de la roca fosfórica en el campo depende de todo un grupo de factores. La mayoría de los métodos de extracción convencionales están basados en aquellos utilizados al comienzo de la era de la industria de los fosfatos (Lenglen, 1935). Estos incluyen el uso de los ácidos orgánicos encontrados en el suelo como resultado del metabolismo microbiano y de la descomposición de la materia orgánica y como productos de exudación radicular que ayudan a las raíces en la absorción de los fosfatos (Amberger, 1978). El agua sería el elemento ideal de extracción debido a que es un compuesto natural (comparado a los electrolitos alcalinos o ácidos) y de menor interferencia con el equilibrio iónico entre las fases sólida y líquida (Van der Pauw, 1971). Sin embargo, la medición de muy bajas concentraciones de fósforo en la solución suelo presenta dificultades analíticas. Los elementos químicos de extracción incluyen reactivos tales como el oxalato, el citrato, el etilen-diamino-tetra-acetato de sodio, el citrato de amonio alcalino y varios ácidos débiles (ácidos oxálico, láctico, málico, acético, cítrico y fórmico) los cuales disuelven y forman complejos con el fósforo de las rocas fosfóricas. Diversos estudios han evaluado estos métodos (Engelstad *et al.*, 1974; Chien y Hammond, 1978; Mackay *et al.*, 1984; Rajan *et al.*, 1992). Los productos químicos más comúnmente utilizados son el citrato de amonio neutro, el ácido cítrico al 2 por ciento y el ácido fórmico al 2 por ciento.

### Mediciones de la solubilidad utilizando técnicas químicas convencionales

Los contenidos de  $P_2O_5$  total y de CaO de las rocas fosfóricas y su solubilidad se obtienen utilizando técnicas químicas convencionales. El Cuadro 8 muestra estos datos para las rocas fosfóricas africanas. El fósforo total en las rocas fosfóricas varía de 27 a 36 por ciento de  $P_2O_5$  y los contenidos de CaO son más elevados que los valores de  $P_2O_5$ . Esto es debido a la composición de la apatita que contiene 10 átomos de Ca por cada seis átomos de P y a la posible presencia de los carbonatos libres. Además del P, el calcio liberado de las rocas fosfóricas puede jugar un papel importante en el equilibrio iónico del suelo y en la nutrición de las plantas cultivadas en los suelos ácidos tropicales.

Los datos de la solubilidad en los tres reactivos convencionales son diferentes según su poder de extracción. Sin embargo, están estrechamente relacionados y clasifican las

CUADRO 8  
Análisis químico y solubilidad en reactivos convencionales de rocas fosfóricas africanas seleccionadas

Rocas Fosfóricas	Contenido total (% mineral)		Solubilidad expresada en % $P_2O_5$ total			Sustitución $CO_3/PO_4$
	$P_2O_5$	CaO	Citrato de amonio neutro	Ácido cítrico	Ácido fórmico	
Arli	30,8	47,6	5,4	19,2	38,7	0,098
Kodjari	30,1	44,8	6,1	18,8	37,1	0,093
Tahoua	34,5	44,8	8,3	19,3	34,0	0,112
Taiba	36,5	44,8	5,0	19,8	38,7	0,098
Tilemsi	27,9	43,1	10,4	29,7	47,3	0,210
Hahotoe	35,4	36,4	4,3	19,1	36,7	0,088
Gafsa	30,2	31,9	20,5	37,8	78,6	0,254

Fuente: Truong *et al.*, 1978.

rocas fosfóricas en el mismo orden relativo: Gafsa, Tilemsi y luego siguen las otras en el mismo grupo. El Cuadro 8 también muestra una buena relación entre la solubilidad en los diferentes extractantes y la relación  $\text{CO}_3/\text{PO}_4$ , que indica el grado de sustitución isomórfica de  $\text{PO}_4$  por  $\text{CO}_3$  en la estructura de la apatita. Cuanto mayor sea el grado de sustitución, más alta será la solubilidad en los reactivos estándares (Capítulo 3; Lehr y McClellan, 1972).

#### *Expresiones de la solubilidad de las rocas fosfóricas*

La expresión de la solubilidad del fósforo en la roca fosfórica puede ser un problema. En los estudios con diversas fuentes de rocas fosfóricas que poseen una gran variación en el contenido de P total, Chien (1993) propuso que la solubilidad de las rocas fosfóricas sea expresada más apropiadamente como porcentaje de la roca más bien que como porcentaje del contenido de P total (Capítulos 3 y 11). Esto es debido a que prácticas poco escrupulosas tales como la mezcla de la roca fosfórica con arena pueden aumentar el coeficiente de extractabilidad (Capítulo 11), conduciendo a conclusiones incorrectas sobre la reactividad de las rocas fosfóricas.

En general, por razones prácticas se prefiere expresar la solubilidad como el porcentaje del contenido de P total. Por ejemplo, el porcentaje del P total que es soluble en un reactivo indica la reactividad de la roca fosfórica. Además, la dosis de aplicación de un fertilizante fosfatado se calcula según el contenido de P total. La expresión de la solubilidad del fósforo como el porcentaje del contenido de P total será recomendada solamente cuando representa una característica intrínseca de una roca individual y/o cuando se comparan varias rocas fosfóricas que poseen un contenido semejante de P total. Sin embargo, es posible superar este problema considerando la solubilidad conjuntamente con el contenido de P total de las rocas fosfóricas.

Otra expresión propuesta por Lehr y McClellan (1972) es el índice de solubilidad absoluta (ISA), obtenido de la siguiente manera:

$$\text{ISA} = [(\% \text{ de P soluble}) / (\% \text{ P en la apatita})] \times 100$$

El porcentaje teórico del contenido de P en la apatita puede ser calculado a partir de las dimensiones de los parámetros  $a$  y  $c$ . De esta manera es posible eliminar la variabilidad del contenido de apatita en los minerales y del P total en las apatitas (Lehr y McClellan, 1972). El porcentaje de P soluble dependerá de la prueba específica seleccionada. La mayor desventaja del método del índice de solubilidad absoluta es que los estudios cristalográficos son costosos y requieren personal entrenado y laboratorios especializados con equipos complejos para los análisis de rayos X. Por lo tanto, deberían ser reservados para los estudios básicos de caracterización de los principales depósitos de fosfato.

#### *Efecto del tamaño de partículas sobre las mediciones de la solubilidad*

Como las rocas fosfóricas son minerales relativamente insolubles, su área geométrica es un parámetro importante que determina su tasa de disolución. En el caso de las rocas fosfóricas sedimentarias el área geométrica externa es cerca del 5 por ciento del total del área externa debido a la estructura porosa de las partículas de la roca fosfórica (Lehr y McClellan, 1972). En las rocas fosfóricas ígneas con estructuras cristalinas gruesas sin superficies internas, tanto el área geométrica externa como el total de área externa son semejantes.

El tamaño de las partículas de la roca fosfórica es también importante: cuanto más pequeño es el tamaño de partícula, mayor es el área geométrica externa y también el grado de contacto entre el suelo y las partículas de la roca fosfórica y, por lo tanto, mayor es la tasa de disolución de la roca. El punto de separación para el tamaño de partículas de la roca fosfórica parece ser la malla 100 (149  $\mu\text{m}$ ) debido a que el costo de

CUADRO 9  
Fósforo (P) soluble en citrato de la roca fosfórica de Carolina del Norte en función del tamaño de las partículas

Tamaño de Partículas		P Total		P soluble citrato
Malla	Micrones	%	% RF	% P total
-35	500	13,2	2,7	20,5
-65	230	12,9	2,8	21,7
-100	149	12,9	3,3	25,5
-200	74	13,2	3,8	28,7

Fuente: Chien y Friesen, 1992.

Cuadro 9 muestran una relación positiva entre la finura del tamaño de partículas de la roca fosfórica de Carolina del Norte y el incremento del P soluble en el citrato de la roca fosfórica (Chien y Friesen, 1992). En conclusión, las mediciones de la solubilidad de la roca fosfórica deben hacerse en las muestras de la misma distribución de tamaño de partículas, que han sido obtenidas del mismo proceso de molienda.

#### *Efecto de los minerales asociados en las mediciones de la solubilidad*

Las rocas fosfóricas contienen generalmente materiales endoganga y exoganga como la calcita, la dolomita, el yeso, el cuarzo, los óxidos de hierro y de aluminio y las arcillas (Lehr y McClellan, 1972). Entre todos, los carbonatos libres poseen una mayor influencia sobre la disolución de la roca fosfórica debido a que son más solubles que la apatita. También consumen una parte de los reactivos químicos, especialmente los extractores débiles como el citrato de amonio neutro utilizados en las pruebas de solubilidad. Para superar este problema de reacción preferencial en las mediciones de la solubilidad, Chien y Hammond (1978) eliminaron el primer extracto del citrato de amonio neutro y midieron la cantidad de P disuelto en el segundo extracto. Mackay *et al.* (1984) y Rajan *et al.* (1992) encontraron que la suma de cuatro extractos era más representativa.

Los minerales asociados tienen menos influencia sobre los elementos ácidos de extracción (Rajan *et al.*, 1992; Chien, 1993). Incrementando la concentración del ácido cítrico del 2 al 5 por ciento y luego a 15 por ciento, Mackay *et al.* (1984) pudieron extraer 21, 44 y 59 por ciento del P en la roca fosfórica, respectivamente. La influencia de los carbonatos libres disminuye con la concentración de los elementos de extracción. Entre los tres métodos más comúnmente utilizados, el ácido fosfórico al 2 por ciento será preferido como un procedimiento químico de extracción simple.

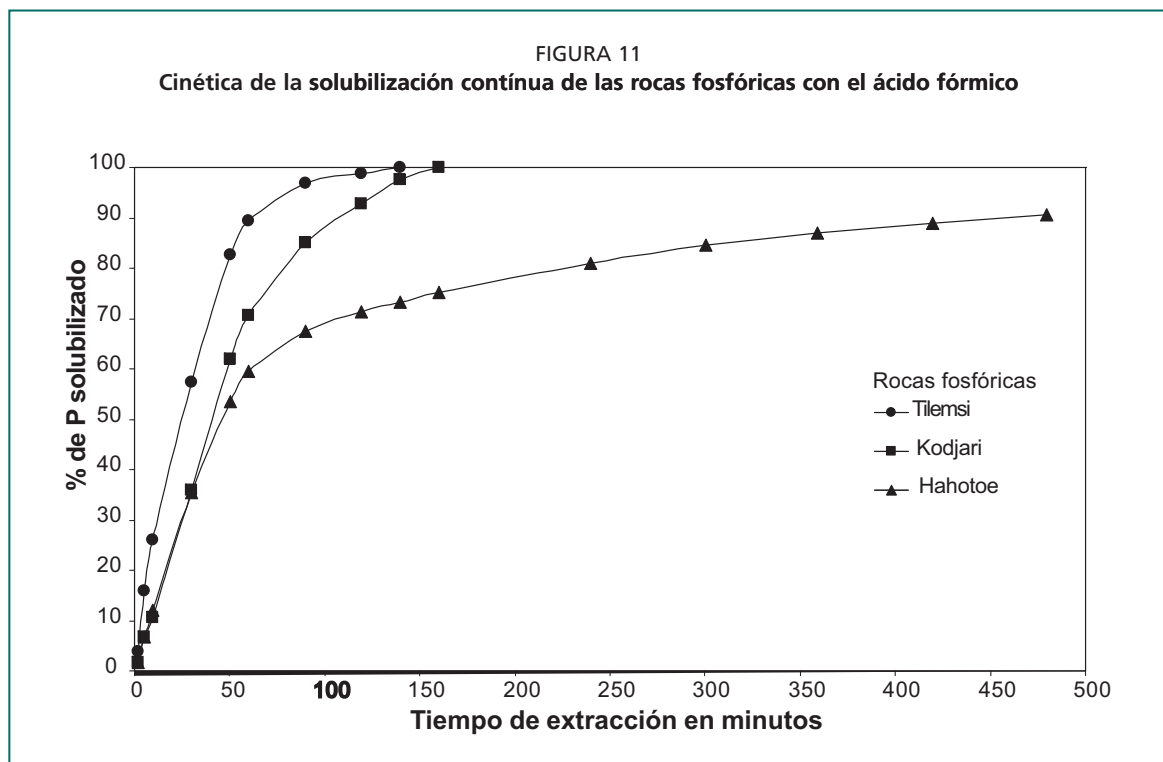
#### **Cinética de la disolución de la roca fosfórica a largo plazo**

Las pruebas estándar de solubilidad son solamente cualitativas por naturaleza debido a que utilizan procedimientos que limitan la solubilización de la roca fosfórica ya sea por un corto tiempo de reacción o por una pequeña relación muestra/solución de extracción. Por lo tanto, estas pruebas convencionales enfocan la evaluación de la eficiencia de las rocas fosfóricas a corto plazo.

Los procedimientos de la extracción sucesiva o en secuencia pueden mejorar considerablemente la capacidad predictiva de las pruebas mediante la extracción de una mayor proporción del fósforo total sin realizar la disolución completa de la roca fosfórica.

Truong y Fayard (1995) propusieron un procedimiento simple complementario para medir la cinética de solubilización de la roca fosfórica con el tiempo. La muestra de roca (1 g) se coloca en un embudo o un tubo cónico, cerrado en el extremo con lana de vidrio y se aplica continuamente una solución de ácido fórmico al 2 por ciento sobre la muestra de la roca fosfórica a una tasa de 1 gota por segundo. Un estudio preliminar mostró que después de 4 horas y 300 ml de solución aplicada, la mayor parte del P

una molienda más fina sería prohibitivo en comparación a cualquier aumento en efectividad. Rajan *et al.* (1992) informan que el aumento en P químicamente extraíble obtenido con la molienda de las rocas fosfóricas estuvo relacionado positivamente con la reactividad de las rocas. Encontraron que cuanto mayor es la reactividad de la roca fosfórica, mayor es el incremento en P extraíble debido a la molienda. Los datos presentados en el



de las rocas fosfóricas había sido disuelto. La Figura 11 presenta algunos de estos resultados.

La ventaja de este procedimiento es que elimina todo el P y Ca disueltos. De esta manera no hay ninguna acumulación sobre la superficie de las partículas, lo que podría impedir la solubilización adicional de la roca fosfórica. Las soluciones extraídas pueden ser analizadas a intervalos de tiempo seleccionados para trazar una curva de disolución en función del tiempo.

En general las curvas presentadas en la Figura 11 constan de dos partes. La primera parte es una zona de solubilización rápida durante unos 50-60 minutos, la que podría estar relacionada con la eficiencia a corto plazo. En esta zona las curvas de las diferentes rocas fosfóricas son de pendiente pronunciada y cercanas entre ellas. La segunda parte es una zona de solubilización lenta con un cambio marcado de pendiente, que corresponde al efecto a largo plazo. Algunas rocas fosfóricas son difíciles de solubilizar completamente debido a que están cementadas por el sílice o encerradas entre los óxidos de hierro y aluminio (Lehr y McClellan, 1972). En el estudio de la Figura 11, la roca fosfórica de Tilemsi confirmó su alta reactividad a corto y a largo plazo. Este procedimiento toma más tiempo que una extracción simple. Sin embargo, no es más exigente que las extracciones sucesivas o secuenciales y proporciona más información sobre la disolución de la roca fosfórica con el tiempo.

### Escalas de reactividad de la roca fosfórica y la respuesta de rendimiento de los cultivos

Las escalas de reactividad de la roca fosfórica sirven no sólo para comparar diversas fuentes de roca sino también para predecir su efectividad agronómica potencial. Cuando se aplica una roca fosfórica reactiva al suelo, se solubiliza bajo condiciones ideales. Así el P disponible dará como resultado una buena respuesta del cultivo, cuando el suministro de P es un factor limitante. Sin embargo, la relación no es directa debido a que muchos factores y sus interacciones determinan la efectividad agronómica final de las rocas fosfóricas (Mackay *et al.*, 1984; Rajan *et al.*, 1996). No obstante,

CUADRO 10  
Coeficientes de correlación entre las escalas de reactividad de siete rocas fosfóricas y los rendimientos de los cultivos

	Citrato de amonio neutro	Ácido cítrico 2 %	Ácido fórmico 2 %
Experimento en invernadero			
Pasto Guinea			
Dosis de P, ppm			
50	0,65	0,78*	0,76*
100	0,78*	0,86*	0,89*
200	0,89**	0,93**	0,95**
400	0,88**	0,92**	0,96**
Experimento en campo			
Frijol común			
Dosis de aplicación, kg P/ha			
22	0,75*	0,79*	0,89**
44	0,65	0,71	0,81*
88	0,59	0,65	0,76*
176	0,63	0,74	0,85*

\* significativo al 5 por ciento.

\*\* significativo al 1 por ciento.

Fuente: Chien y Hammond, 1978.

se han encontrado buenas correlaciones para un grupo específico de condiciones. Por ejemplo, en Tailandia, la solubilidad en el ácido cítrico neutro de las rocas fosfóricas se correlacionó positivamente con el rendimiento en grano del arroz inundado (Engelstad *et al.*, 1974) y con el rendimiento en materia seca de pasto Guinea (*Panicum maximum*) en un oxisol de Colombia (Chien y Van Kauwenbergh, 1992). Sin embargo, varios estudios han encontrado que el ácido fórmico es el mejor indicador de la respuesta de los cultivos (Chien y Hammond, 1978; Mackay *et al.*, 1984; Rajan *et al.*, 1992).

El estudio de Chien y Hammond (1978) ilustra el valor de la prueba del ácido fórmico; midieron los índices de solubilidad de siete rocas fosfóricas con varios métodos de laboratorio y la respuesta de rendimiento de los cultivos a estas rocas fosfóricas en dos suelos

de Colombia (oxisol y andosol) en experimentos en invernadero y en el campo. Encontraron que el ácido fórmico al 2 por ciento dio el coeficiente de correlación más alto y de mayor significación con la respuesta de rendimiento de los cultivos, seguido por el ácido cítrico al 2 por ciento y el citrato de amonio neutro (Cuadro 10). La eficiencia de las rocas fosfóricas varió ampliamente con las dosis de aplicación de P y la duración del experimento. En bajas dosis de P, las rocas fosfóricas reactivas aportaron P rápidamente y fueron superiores mientras que las rocas menos reactivas liberaban lentamente una pequeña cantidad de P. En altas dosis de aplicación, las rocas fosfóricas reactivas liberaron al comienzo una mayor proporción de P y la fracción no utilizada fue convertida en el suelo a formas menos disponibles. Por el contrario las rocas fosfóricas menos reactivas liberaron una mayor cantidad de P con el tiempo y de este modo aportaron un aprovisionamiento adecuado al cultivo. Esto mejoró su efectividad con el pasar del tiempo.

#### Normalización e índices de reactividad

Las rocas fosfóricas pueden ser utilizadas como materia prima para el procesamiento industrial en la fabricación de los fertilizantes fosfatados y para la aplicación directa en la agricultura. Los criterios de calidad para estos dos usos pueden ser diferentes debido a que la industria moderna de fertilizantes exige normas estrictas de calidad para las materias primas que utiliza en los procesos específicos de fabricación. No solamente el grado (contenido de  $P_2O_5$ ) de la roca fosfórica es importante sino que también deben ser considerados otros valores límites. Por ejemplo la relación  $CaO/P_2O_5$  es muy importante debido a su influencia sobre el consumo de ácido cuando se disuelve la roca fosfórica. Cuando la relación excede 1,6 el proceso de acidificación húmeda no es económico. Las impurezas de aluminio (Al) y hierro (Fe) son particularmente un obstáculo en el proceso húmedo. Una relación  $(Al_2O_3 + Fe_2O_3)/P_2O_5 > 0,10$  se considera como crítica. Además, una relación  $MgO/P_2O_5 > 0,022$  no es deseable debido a su efecto perjudicial sobre la producción de ácido fosfórico.

Los factores de calidad para la aplicación directa son diferentes. Así las rocas fosfóricas adecuadas para la aplicación directa son consideradas como «minerales problema» debido a su calidad inferior y al contenido de minerales accesorios y de impurezas

(Hammond *et al.*, 1986b). La presencia de carbonatos (calcio y magnesio) como minerales accesorios puede ser útil para la nutrición de las plantas y como enmienda del suelo. Los contenidos de Al y Fe comúnmente no tienen mayor importancia. Aparte de las condiciones adecuadas para el beneficio, los factores más importantes en la evaluación para la aplicación directa son el grado (contenido de  $P_2O_5$ ) y la reactividad de la apatita (solubilidad).

En algunos depósitos geológicos, los minerales de las rocas fosfóricas varían dentro del mismo depósito. El Cuadro 11 presenta ejemplos de varios depósitos.

Algunos estratos son más reactivos que otros. Una explotación adecuada de los depósitos debe considerar su calidad en relación con la utilización de la roca fosfórica para el procesamiento industrial o la aplicación directa.

Las directivas para los índices de reactividad varían según los países. Las normas de la Comunidad Europea para roca fosfórica para aplicación directa son estrictas considerando que en Europa la mayoría de los suelos no son ácidos, la precipitación anual es moderada y los cultivos son estacionales. Para asegurar una adecuada efectividad agronómica, los siguientes tres tipos de rocas fosfóricas pueden ser vendidos como fertilizantes.

- Roca fosfórica fina: 25 por ciento  $P_2O_5$  total, 55 por ciento soluble en el ácido fórmico al 2 por ciento, 90 por ciento de las partículas < 63  $\mu m$ , 99 por ciento < 125  $\mu m$ .
- Roca fosfórica semi-fina: 25 por ciento  $P_2O_5$  total, 45 por ciento soluble en el ácido fórmico al 2 por ciento, 90 por ciento de las partículas < 160  $\mu m$ .
- Roca fosfórica dura: 25 por ciento  $P_2O_5$  total, 10 por ciento soluble en el ácido fórmico al 2 por ciento, 90 por ciento de las partículas < 160  $\mu m$ .

Respecto a las normas de los Estados Unidos de América, en el Capítulo 3 se presenta una clasificación de las rocas fosfóricas propuesta por Diamond (1979) para la aplicación directa basada en su solubilidad y las respuestas iniciales esperadas de los rendimiento de los cultivos.

En Australia y en Nueva Zelanda, la mayoría de las rocas fosfóricas son utilizadas para su aplicación en las pasturas permanentes y el índice de reactividad está considerado como el 30 por ciento soluble en el ácido cítrico al 2 por ciento (Sale *et al.*, 1997a).

Estos ejemplos sugieren que el índice de reactividad debe ser adaptado a las condiciones locales. Por ejemplo en las zonas tropicales de África y América Latina, donde los suelos son muy ácidos y la precipitación alta, o en el sudeste de Asia en los cultivos perennes de plantaciones, los valores límites del índice podrían ser fijados a un nivel más bajo que los antes indicados.

CUADRO 11

#### Variaciones espaciales en muestras de rocas fosfóricas dentro del mismo depósito

Depósito de roca fosfórica	$P_2O_5$ Total (% roca)	Solubilidad en ácido fórmico 2 % (% $P_2O_5$ total)
Monte Fresco (Venezuela)		
Estrato intacto	27,4	10,7
Estrato lixiviado	33,2	16,7
Navay (Venezuela)		
Estrato superficial	22,6	40,0
Estrato profundo	19,5	64,4
Matam (Senegal)		
Bloque Este	18,3	20,1
Bloque Oeste	34,3	71,0

Fuente: Truong y Cissé, 1985; Truong y Fayard, 1988.

### Medición del P intercambiable de la roca fosfórica con las técnicas radioisotópicas

Las técnicas isotópicas utilizando los radioisótopos emisores de radiación beta, el  $^{32}P$  (vida media = 14,3 días) o el  $^{33}P$  (vida media = 25,3 días) proporcionan otra manera de medir el P intercambiable liberado de las rocas fosfóricas manteniendo sin cambio el equilibrio iónico entre las fases líquida y sólida. Si bien estas técnicas proveen información cuantitativa y precisa, su utilización requiere personal entrenado con adecuados conocimientos y experiencia, así como instalaciones funcionales de

CUADRO 12

## Cinética de intercambio isotópico y solubilidad en el agua de las rocas fosfóricas

Rocas fosfóricas	% <sup>32</sup> P restante en la solución			Valor E después de 4 h	Solubilidad en agua
	1 min	10 min	100 min	% P total	% P total
Hahotoe	28,27	15,27	8,98	0,28	0,057
Kodjari	23,60	13,52	7,92	0,17	0,032
Tilemsi	0,58	0,21	0,08	3,87	0,007
Gafsa	0,23	0,10	0,07	3,61	0,006

Fuente: Truong *et al.*, 1978.

laboratorio que estén conformes a las regulaciones de seguridad y de protección radiológica (Zapata y Axmann, 1995).

Las aplicaciones de las técnicas radioisotópicas incluyen la técnica de la cinética del intercambio isotópico basado en el uso del <sup>32</sup>P para medir la dinámica de P del suelo en el laboratorio, en particular el P intercambiable o valores E a tiempos seleccionados (Fardeau, 1981). Existen también mediciones indirectas utilizando las plantas, tales como el P lábil o valores L (Larsen, 1952) o a partir de la dilución isotópica el P derivado de la roca fosfórica que está disponible para la planta (Zapata y Axmann, 1995).

En el estudio con las rocas fosfóricas africanas, se determinaron los valores de P intercambiable (valores E). Para esto se inyectó una cantidad de iones fosfato <sup>32</sup>P libre de portador en una suspensión de suelo en agua (relación 1 g en 100 ml). En tiempos determinados, 10 ml de la suspensión fueron tomados y filtrados usando filtros Millipore para luego determinar la concentración de P (Cp) y la radioactividad (r) de la solución. El P isotópicamente intercambiable (valor E) fue calculado utilizando la fórmula general de dilución isotópica  $E = C_p \times R/r$ . Los resultados se presentan en el Cuadro 12.

La técnica del intercambio isotópico puede diferenciar las rocas fosfóricas en muy corto tiempo. Después de 1 minuto se pueden distinguir claramente dos grupos: más del 99 por ciento del <sup>32</sup>P adicionado ha intercambiado con el P de las rocas fosfóricas de Gafsa y de Tilemsi mientras que sólo 75 por ciento intercambió con el P de las rocas fosfóricas de Kodjari y de Hahotoe. Si bien el intercambio isotópico es un proceso rápido, las reacciones continuarán hacia el equilibrio. Después de 4 horas, las diferencias entre los dos grupos fueron confirmadas por sus valores E. El P intercambiable es un indicador de sus reactividades específicas. Sin embargo, la diferenciación entre las rocas fosfóricas dentro del mismo grupo (Gafsa y Tilemsi) requiere un tiempo más largo de contacto de unas 24 horas (Fardeau, 1993) o de varias semanas. La solubilidad del fósforo de las rocas fosfóricas en el agua fue muy baja para todos los fosfatos y los datos no fueron útiles para seleccionar las rocas fosfóricas (Cuadro 12).

## REACCIONES ENTRE LAS ROCAS FOSFÓRICAS Y EL SUELO

### Incubación en el suelo

Incubar los suelos tratados con las rocas fosfóricas ofrece la posibilidad de medir la disolución de la roca fosfórica en suelos seleccionados con propiedades diferentes. Además, ciertas rocas fosfóricas pueden tener cantidades importantes de carbonatos libres y otros minerales que pueden modificar las características de los suelos cuando las rocas fosfóricas se disuelven. Los estudios de incubación cerrada para determinar las tasas de disolución de las rocas fosfóricas presentan limitaciones debido a que los productos de la reacción no son eliminados y, por lo tanto, los resultados podrían ser alteraciones experimentales. Se prefieren los estudios de incubación abierta donde el suelo tratado con la roca fosfórica es colocado en un depósito abierto y se adiciona una cantidad de agua simulando las condiciones locales de lluvia. Se colecta la solución filtrada y se analizan P, Ca y otros elementos. Según los intervalos seleccionados las muestras de suelo son también analizadas para medir la roca fosfórica disuelta.



Los estudios de incubación cerrada de Mackay y Syers (1986) mostraron que la reacción de disolución alcanzó un equilibrio a los 50 días. Se asume que en este punto, en ausencia de mecanismos de remoción tales como la absorción por las plantas o la lixiviación, la concentración de P en la solución suelo en este estudio había aumentado hasta un nivel donde cualquier disolución adicional de la roca fosfórica fue detenida.

En otro estudio de incubación, Jadin y Truong (1987) compararon la roca fosfórica de Gafsa, de alta reactividad, y la roca fosfórica de Hahotoe, de baja reactividad, con el superfosfato triple, un fertilizante soluble en agua, incluyendo un control sin fosfato. El suelo fue un oxisol de Njole, Gabón con un pH en agua de 4,3 y una capacidad de retención de 234 ppm P. La dosis de aplicación fue de 100 mg/kg. El P disponible fue medido con el método de Olsen modificado por Dabin (1967) para estimar el P solubilizado de las rocas fosfóricas. Los datos del Cuadro 13 reflejan el resultado neto de las reacciones opuestas, que ocurren durante la disolución de la roca fosfórica. Estas incluyen la liberación de P de la roca fosfórica disuelta en la solución suelo, la retención del P disuelto por los coloides del suelo y su conversión en formas no disponibles para las plantas. Las tasas de disolución en base a los datos del P disponible (método Olsen-Dabin) fueron 84 por ciento para el superfosfato triple, 58 por ciento para la roca fosfórica de Gafsa y 35 por ciento para la roca fosfórica de Hahotoe. La diferencia entre las rocas fosfóricas estaba de acuerdo con los resultados obtenidos con otras técnicas de evaluación, en particular la reactividad de la roca fosfórica.

Las aplicaciones antes de la siembra pueden ser una ventaja en los suelos de bajo poder tampón para el P pero no necesariamente en suelos con alto poder tampón para el P (Chien *et al.*, 1990b). La disponibilidad del P adsorbido fue medida en función de la capacidad de adsorción a fin de controlar la validez de esta hipótesis. En el estudio de Njole, 63 por ciento del P adsorbido permaneció intercambiable durante la fase de desorción utilizando la técnica de la dilución isotópica con  $^{32}\text{P}$  (Jadin y Truong, 1987). Por lo tanto, es necesario evaluar la capacidad total de retención de P del suelo cuando se planifican hacer aplicaciones de la roca fosfórica al suelo antes de la siembra.

### Efecto de encalado de las rocas fosfóricas

Utilizando cálculos teóricos se puede estimar el equivalente en carbonato de calcio (ECC) de la roca fosfórica como la suma de los minerales ganga y del carbonato en la apatita. Este también puede ser determinado por medio del método de la Asociación de Químicos Analíticos Oficiales (AOAC), en el cual 1 g de roca fosfórica es añadido a 50 ml de HCl 0,5 N y la acidez restante es medida por titulación inversa (Sikora, 2002). Normalmente el ECC representa cerca del 50 por ciento de la roca fosfórica. Estos estimados (efecto de encalado potencial) asumen una solubilización total de la roca fosfórica.

Un estudio en invernadero evaluó el valor del encalado potencial de algunas rocas fosfóricas de América del Sur y de África Occidental aplicadas a un suelo ultisol. Se encontró que las rocas fosfóricas de reactividad media y alta pueden aportar Ca a las plantas creciendo en los suelos ácidos con bajo Ca intercambiable (Hellums *et al.*, 1989). En otro experimento en un oxisol de Gabón la aplicación de la roca fosfórica de Gafsa incrementó el pH del suelo en 0,5 unidades (Cuadro 13). Las dosis más altas de rocas fosfóricas pueden producir mayores incrementos de pH. Los efectos de la liberación de Ca de las rocas fosfóricas pueden ser también importantes debido al aporte de Ca para la nutrición de las plantas, su contribución a la saturación de las bases y la disminución

CUADRO 13

Efectos de la incubación de las rocas fosfóricas sobre las características de un oxisol de Njole, Gabón

Tratamientos	P disponible (Olsen-Dabin) mg/kg	pH	Ca intercamb. meq/100g	Al intercamb. meq/100g
Control	31	4,0	0,9	0,12
SFT	110	4,3	1,2	0,07
RF de Hahotoe	46	4,1	1,6	0,09
RF de Gafsa	76	4,5	2,1	0,01

RF = roca fosfórica. SFT = superfosfato triple.

Fuente: Jadin y Truong, 1987.

de la toxicidad de Al. Este resultado está reflejado no sólo por la disminución del Al extraíble sino también por el aumento del nivel de Ca intercambiable (Kamprath, 1970).

Si bien los aumentos potenciales en el pH del suelo resultantes de la disolución de la roca fosfórica son pequeños (Sinclair *et al.*, 1993b), pueden tener un efecto importante en los niveles de saturación de Al en los suelos tropicales. Estudios con los ultisoles y oxisoles en Puerto Rico mostraron que la saturación de Al disminuyó desde 60 por ciento a pH 4,2, a 35 por ciento a pH 4,5 y a 20 por ciento a pH 4,8 (Pearson, 1975). Estos efectos pueden mejorar significativamente las propiedades químicas del suelo, especialmente en los suelos muy ácidos y degradados tales como los suelos sulfato-ácidos en el sudeste de Asia (Truong y Montange, 1998).

En conclusión, el efecto de encalado de la roca fosfórica existe pero es de poca importancia. Las dosis normales de aplicación de la roca fosfórica (100-200 kg/ha) con un valor neutralizante efectivo de 50 por ciento son equivalentes a 50-100 kg de cal por hectárea. Sin embargo, a pesar de estas pequeñas cantidades, las rocas fosfóricas de reactividad mediana a alta pueden tener efectos benéficos sobre las propiedades químicas de los suelos tropicales altamente edafizados.

### ENSAYOS EN INVERNADERO

El siguiente paso en la evaluación consiste en los experimentos en macetas usando una planta indicadora. Tienen la ventaja de ser relativamente poco costosos y de permitir estudiar varios factores tales como el tipo de suelo, los materiales de las rocas fosfóricas y las especies de plantas que influyen la eficiencia agronómica de las rocas fosfóricas.

Este método puede generalmente controlar otros factores que influyen el crecimiento de las plantas tales como la iluminación, la humedad, la temperatura y las enfermedades, lo que es a menudo difícil de realizar en el campo. Sin embargo, las condiciones de crecimiento y desarrollo de las plantas en invernadero son normalmente muy diferentes de las condiciones de campo. Por ejemplo el volumen, la profundidad y la estratificación de los horizontes naturales del suelo en el campo influyen el desarrollo del sistema radicular en los diferentes lugares del perfil y regulan el almacenamiento y el movimiento de agua y de los elementos nutritivos en el suelo. Estas condiciones son difíciles de reproducir en una maceta (Rajan *et al.*, 1996). Teniendo en cuenta la característica de liberación lenta de las rocas fosfóricas una evaluación en el campo a largo plazo requiere variaciones en las condiciones de clima y de suelo así como en las prácticas de manejo de los sistemas de cultivo.

Existen ciertas consideraciones prácticas de importancia para conducir los experimentos en maceta. El tamaño de la maceta depende de la planta indicadora y de la duración prevista del experimento. Las macetas de 2 a 5 litros de capacidad son normalmente utilizadas para obtener rendimiento en grano con los cereales de grano pequeño y las leguminosas de grano. La duración del experimento depende de los objetivos del estudio. Algunos estudios recomiendan la cosecha de las plantas en el período de máxima demanda de P por las plantas tales como el espigado para los cereales y la floración o la formación de las vainas para las leguminosas. Otros enfocan el efecto de los tratamientos sobre el rendimiento de grano y, por lo tanto, los cultivos serán mantenidos hasta la madurez. Para comparar un gran número de rocas fosfóricas en un amplio rango de suelos, se recomienda utilizar gramíneas de grano pequeño como el *Agrostis* sp. en 100-200 g de suelo por maceta o la ballica o raigrás en macetas conteniendo 500-1 000 g de suelo. Un crecimiento rápido permite varios cortes a intervalos de 2-4 semanas. El *Agrostis* es particularmente interesante por sus semillas de tamaño pequeño (100 semillas pesan 12-15 mg y contienen 50-60 µg P) y su respuesta al nivel fosfórico del suelo (Truong y Pichot, 1976). Un gran número de semillas por maceta es importante para asegurar la homogeneidad de la germinación, del macollaje

y de la producción de biomasa. La dosis de aplicación de P debe variar entre 25 y 400 mg por kilogramo de suelo. Las dosis bajas (25-50 mg/kg) son a menudo insuficientes en los suelos de bajo nivel de P y de alta capacidad de retención de P y en ese caso los efectos no son detectados. Las dosis altas (400 mg/kg o más) pueden producir perturbaciones en el equilibrio iónico del suelo (Zapata y Axmann, 1995).

El estudio con las rocas fosfóricas africanas de Truong *et al.* (1978) realizó una comparación de siete rocas fosfóricas de diversas reactividades utilizando un fertilizante soluble como el superfosfato triple y un control sin aplicación de P. Las fuentes de P fueron aplicadas a una dosis de 100 mg de P por kilogramo de suelo en macetas de 100 g de suelo. Los tres suelos usados fueron un alfisol de Níger (pH en agua 6,5; capacidad de retención de P según Langmuir: 16 ppm), un vertisol de Senegal (pH en agua 5,9; capacidad de retención de P según Langmuir: 1 067 ppm) y un andosol de Madagascar (pH en agua 4,3; capacidad de retención de P según Langmuir: 3 818 ppm). Todos los suelos eran muy deficientes en P disponible. Los suelos y los fertilizantes fueron mezclados completamente con los niveles adecuados de otros nutrientes para asegurar que el fósforo era el único factor que tenía influencia sobre los resultados. Se aplicó también una cantidad de  $^{32}\text{P}$  libre de portador para determinar el P intercambiable (valores L) según Larsen (1952). Las plantas de *Agrostis* fueron cortadas cada mes con un total de cuatro cortes para determinar la materia seca y el P absorbido. Los tratamientos con los fertilizantes fosfatados (superfosfato triple y roca fosfórica) produjeron los rendimientos de materia seca significativamente más altos y tuvieron una absorción de P y valores L más grandes que el control, el tratamiento con el superfosfato triple produjo los más altos rendimientos (Cuadro 14). Los valores para los tratamientos con las rocas fosfóricas variaron de suelo a suelo pero la clasificación relativa quedó casi la misma, es decir la roca fosfórica de Gafsa fue la más reactiva, seguida por la roca fosfórica de Tilemsi y algunas veces la roca fosfórica de Tahoua fue mejor que las otras. La absorción de P parece ser un parámetro más sensible que la materia seca para diferenciar las rocas fosfóricas. En general, los resultados confirmaron que las características intrínsecas de las rocas fosfóricas permanecen como el factor más importante para determinar su valor agronómico potencial.

En conclusión, los experimentos en maceta sirven principalmente para obtener información preliminar sobre la efectividad agronómica potencial de las fuentes de rocas fosfóricas. Son particularmente útiles para integrar los efectos e interacciones de las rocas fosfóricas, los suelos y las plantas bajo condiciones controladas. Sin embargo, los resultados obtenidos en estos experimentos necesitan una interpretación cuidadosa.

CUADRO 14

**Resultados de un experimento en invernadero con las rocas fosfóricas africanas seleccionadas**

Tratamientos	Materia seca (mg/maceta)			P absorbido ( $\mu\text{g P/maceta}$ )			Valor L (ppm P)		
	Suma 4 cortes			Suma 4 cortes			Andosol	Vertisol	Alfisol
	Andosol	Vertisol	Alfisol	Andosol	Vertisol	Alfisol			
Control sin P	635d	1 165f	235 e	478 e	832f	146e	30f	38e	6e
Arlí	1 343c	1 505de	320d	1 968d	1 282e	186cd	77e	39e	28d
Kodjari	1 336c	1 430e	332d	1 720d	1 267e	195cd	74e	39e	30d
Tahoua	1 621bc	1 791d	431c	2 496c	1 956d	269c	100c	46d	33c
Taïba	1 389c	1 365e	335d	2 146cd	1 251e	195cd	90d	41e	28d
Tilemsi	1 769b	1 932c	428c	3 352b	2 700c	259c	134b	62c	33c
Hahotoe	1 313c	1 438e	337d	1 919d	1 361e	209cd	91d	45d	30d
Gafsa	1 892ab	2 260b	506b	3 774b	4 575b	318b	139b	94b	42b
SFT	1 974a	2 862a	1 599a	4 078a	6 549a	4 975a	150a	128a	88a

Los valores seguidos por la misma letra no son estadísticamente diferentes ( $P = 0,05$ ).

Fuente: Truong *et al.*, 1978.

### Comparación de las rocas fosfóricas con los fertilizantes estándar

El comportamiento agronómico de las rocas fosfóricas (fertilizante de prueba) respecto a los fertilizantes estándar (o de referencia) que son los fertilizantes fosfatados solubles en agua, es normalmente expresada de dos maneras diferentes. La primera es una comparación horizontal mediante el valor de sustitución que consiste en la relación entre la dosis de P del fertilizante estándar y la del fertilizante de prueba (la roca fosfórica) que es requerida para producir el mismo rendimiento del cultivo. La segunda es una comparación vertical o la respuesta relativa que consiste en la relación entre la respuesta al fertilizante de prueba (la roca fosfórica) y la del fertilizante estándar cuando ambos son aplicados a la misma dosis de P. Ambos métodos tienen ventajas y desventajas.

El valor de sustitución es útil para hacer una evaluación económica de la roca fosfórica con respecto al fertilizante estándar (Chien *et al.*, 1990a) para un nivel de productividad que un agricultor desea obtener. El sistema del valor de sustitución tiene un valor constante independiente de la dosis de P si los fertilizantes de prueba y de referencia tienen el mismo rendimiento máximo, lo que raramente ocurre con las rocas fosfóricas (Rajan *et al.*, 1991a; Ratkowsky *et al.*, 1997). Por esta razón los valores de sustitución son calculados para un nivel deseado de rendimiento (Rajan, 2002) o como una función continua del rendimiento (Singaram *et al.*, 1995).

Como las curvas de respuesta de rendimiento de las rocas fosfóricas y del fertilizante fosfatado soluble en agua no comparten un rendimiento máximo común no es posible calcular un valor de respuesta relativa único para cada fuente. La recomendación es hacer la evaluación para un rango entero de dosis de aplicación. Sin embargo, este método implica un gran número de macetas o unidades experimentales y requiere una supervisión y una logística complicadas. Un compromiso es trabajar con dosis moderadas en la región de la parte lineal de las curvas de respuesta donde el valor de respuesta relativa es simplemente la relación de las pendientes de las partes lineales de las líneas de regresión (Khasawneh y Doll, 1978). Con dosis moderadas de 50-200 mg P por kilogramo de suelo, comúnmente utilizadas en los experimentos en invernadero dependiendo de la textura del suelo, su nivel fosfórico y su capacidad de fijación de P, se ha encontrado que la comparación de diversas fuentes de P fue independiente de la dosis de aplicación de fósforo (Morel y Fardeau, 1989).

Otro índice es conocido como de eficiencia agronómica relativa (EAR) de un fertilizante de prueba (la roca fosfórica). Es determinado expresando en porcentaje la relación entre la respuesta al fertilizante de prueba (tratamiento roca fosfórica-control) y la respuesta al fertilizante estándar cuando ambos son aplicados a la misma dosis:

$$EAR = [(fertilizante \text{ en prueba-control}) / (fertilizante \text{ estándar-control})] \times 100$$

Para que los valores de eficiencia agronómica relativa sean significativos, la diferencia entre el fertilizante estándar y el control debe ser estadísticamente significativa. La roca fosfórica es el fertilizante de prueba y el fertilizante estándar es un fertilizante fosfatado soluble en agua tal como el superfosfato simple o el triple. En base a la ecuación de eficiencia agronómica relativa diversos coeficientes pueden ser calculados para el rendimiento del cultivo o la producción de la materia seca, la absorción de P, la extracción química o los valores L. El Cuadro 15 presenta los datos obtenidos para el estudio con las rocas fosfóricas africanas utilizando el superfosfato triple como fertilizante de referencia. Se observa que la clasificación relativa de las rocas fosfóricas es casi la misma con los diferentes coeficientes aunque los valores reales varían mucho con los suelos. Considerando los valores de eficiencia agronómica relativa basados en la absorción de P, la roca fosfórica de Gafsa fue equivalente (98 por ciento) al superfosfato triple en el andosol pero su eficiencia agronómica relativa fue 54 por ciento en el vertisol y 42 por ciento en el alfisol. Por el contrario, la roca fosfórica de Arli, la de menor reactividad, fue 42 por ciento en el andosol. La clasificación de las rocas fosfóricas para

CUADRO 15

Coeficientes EAR estimados en base a los valores L y al P absorbido. Experimento en invernadero.

Rocas fosfóricas	Coeficiente EAR (%)			Coeficiente EAR (%)		
	(Valor L)			(P absorbido)		
	Alfisol (Tarna)	Vertisol (Richard Toll)	Andosol (Ambohi-mandroso)	Alfisol (Tarna)	Vertisol (Richard Toll)	Andosol (Ambohi-mandroso)
Arli	27	1	39	27	5	42
Kodjari	29	1	37	32	3	35
Tahoua	33	8	58	38	14	52
Taïba	27	3	50	28	5	42
Tilemsi	33	27	87	38	16	69
Hahotoe	29	8	51	31	6	38
Gafsa	44	62	91	42	54	98

Fuente: (Truong *et al.*, 1978).

la aplicación directa permanece relativamente constante pero la eficiencia de las rocas fosfóricas debe ser considerada en relación a las propiedades del suelo.

### Efecto del tiempo

Las rocas fosfóricas son fertilizantes de solubilización lenta. Se necesitan tiempo y agua alrededor de las partículas para permitir que los productos de la disolución se muevan por difusión lejos de las partículas de la roca fosfórica en el volumen del suelo. La evaluación de las rocas fosfóricas africanas en el invernadero fue realizada para observar los cambios que ocurrían con el transcurso del tiempo. Los coeficientes de eficiencia agronómica relativos basados en los valores L y la absorción de P cambiaron considerablemente entre uno y cuatro meses para la mayoría de las rocas fosfóricas en el andosol (Cuadro 16). Las rocas fosfóricas más reactivas de Gafsa y de Tilemsi se solubilizaron rápidamente y su eficiencia no cambió o aumentó ligeramente después de cuatro meses, mientras las rocas fosfóricas menos reactivas necesitaron tiempo para expresar su eficiencia potencial. El mejoramiento de la eficiencia agronómica relativa de las rocas fosfóricas con el tiempo se atribuye a la continuación de la solubilización de la roca fosfórica mientras se mantenga una baja concentración de P en la solución suelo. El mejoramiento también puede ser debido al consumo del P liberado del fertilizante soluble por la absorción de las plantas o por la conversión del P soluble en formas menos disponibles. En general las rocas fosfóricas menos reactivas deben ser molidas más finamente para asegurar un mejor y más largo contacto entre la roca y el suelo.

Otro factor importante que afecta la solubilización de la roca fosfórica es el contenido de agua del suelo. El Cuadro 17 muestra la influencia del contenido de agua del suelo sobre la absorción de P resultante de la aplicación de varias rocas fosfóricas

CUADRO 16

Variaciones temporales de los coeficientes de eficiencia agronómica relativa para las rocas fosfóricas aplicadas a un andosol de Madagascar

Rocas fosfóricas	Coeficiente EAR (%)		Coeficiente EAR (%)	
	(Valores L)		(P absorbido)	
	Después de 1 mes	Después de 4 meses	Después de 1 mes	Después de 4 meses
Kodjari	12	39	19	35
Hahotoe	11	56	24	38
Taïba	19	57	29	42
Tahoua	34	62	49	52
Tilemsi	67	89	72	69
Gafsa	91	89	120	98

Fuente: Truong *et al.*, 1978.

CUADRO 17  
Influencia del contenido de agua del suelo sobre la absorción de fósforo de las rocas fosfóricas en un oxisol de Madagascar

Roca fosfórica	Absorción de fósforo ( $\mu\text{g P / maceta}$ )	
	25 % de la capacidad de campo	50 % de la capacidad de campo
Arli	5,22	9,44
Kodjari	5,35	7,72
Tahoua	8,04	11,78
Taiba	6,26	9,48
Tilemsi	13,41	18,22
Hahotoe	4,66	9,68
Gafsa	26,05	23,69
SFT	24,62	25,33

Fuente : Truong *et al.*, 1978.

CUADRO 18  
Coeficientes de correlación entre la absorción de fósforo y las pruebas de solubilidad

	Andosol	Vertisol	Alfisol
Citrato de Amonio neutro	0,90	0,98	0,87
Ácido cítrico al 2 %	0,90	0,90	0,73
Ácido fórmico al 2 %	0,81	0,91	0,69

Fuente: Truong *et al.*, 1978.

en un oxisol. Los efectos fueron más pronunciados para las rocas fosfóricas menos reactivas.

### Relación entre la solubilidad de la roca fosfórica y la absorción de P por el cultivo

En general, se espera que un incremento en la solubilización de la roca fosfórica conduzca a un aumento del P disponible y esto deberá dar como resultado un aumento de la absorción de P y del rendimiento de los cultivos. Sin embargo, esta relación no es directa debido a los múltiples factores e interacciones que afectan la efectividad agronómica de las rocas fosfóricas (Mackay *et al.*, 1984; Rajan *et al.*, 1996). Normalmente la reactividad prevista de las rocas fosfóricas, evaluada en las pruebas de solubilidad, debería ser validada con los experimentos de invernadero y de campo. El Cuadro 18 presenta los coeficientes de correlación calculados utilizando los datos del Cuadro 8 (solubilidad) y del Cuadro 14 (absorción

de P). Los coeficientes obtenidos son altos para el andosol y el vertisol pero bajos para el alfisol. En el alfisol el pH del suelo es casi neutro y las propiedades químicas no son adecuadas para la solubilización de la roca fosfórica.

### EVALUACIÓN EN EL CAMPO

El último paso en la evaluación de las rocas fosfóricas es la ejecución de los experimentos en el campo en localidades representativas de la región o del país en estudio. Los experimentos en el campo son indispensables para obtener una evaluación realista del comportamiento de las rocas fosfóricas en las condiciones prácticas de la producción agrícola. Una evaluación en el campo a nivel de país es valiosa debido a que la eficiencia agronómica de la roca fosfórica es afectada por las propiedades intrínsecas de la roca, las condiciones de suelo y clima, los sistemas de cultivo y las prácticas de los agricultores. Sin embargo, para ejecutar tal programa se requiere de un equipo de trabajo numeroso y bien entrenado así como de un presupuesto elevado. El Proyecto Nacional sobre las Rocas Fosfóricas Reactivas de Australia proporciona un buen ejemplo de dicho programa (Sale *et al.*, 1997a).

Diversos programas de evaluación en el campo que incluían experimentos en la estación experimental y en la finca o la explotación agrícola con ensayos en muchas localidades han determinado los efectos directos y residuales de las rocas fosfóricas. Dichos programas nacionales se han llevado a cabo en Chile y en Venezuela (Besoain *et al.*, 1999; Casanova, 1992 y 1995; Zapata *et al.*, 1994), en Nueva Zelandia (Sinclair *et al.*, 1993c), en Brasil (Lopes, 1998), en Burkina Faso (Lompo *et al.*, 1995; FAO, 2001b), en Malí (Bagayoko y Coulibaly, 1995; FAO, 2001b), en Togo (Truong, 1986; FAO, 2001b) y en Senegal (Truong y Cisse, 1985; FAO, 2001b). Para mayor información sobre un programa internacional el lector puede referirse al reciente proyecto FAO/OIEA de investigación coordinada (IAEA, 2002).

El ejemplo siguiente ilustra el caso de Burkina Faso, donde la roca fosfórica local de Kodjari fue estudiada en gran detalle debido a su baja reactividad y la dificultad para

solubilizarla con los ácidos minerales (Truong y Fayard, 1987; Frederick *et al.*, 1992). Considerando la ubicación geográfica, los tipos de suelo, las condiciones de clima y los sistemas de cultivo, las áreas potenciales para evaluar la aplicación directa de esta roca fosfórica fueron agrupadas en tres zonas con las siguientes características principales:

	Zona A	Zona B	Zona C
Zona geográfica	Norte y Este	Centro	Oeste y Sudoeste
Precipitación pluvial	Menos de 600 mm	600-800 mm	Más de 800 mm
Suelos	Alfisol, arenoso	Oxisol, limoso	Ultisol, limo-arcilloso
Cultivos principales	Mijo	Sorgo	Maíz
Fertilización	23N-25P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -30K <sub>2</sub> O	34,5N-25P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -30K <sub>2</sub> O	46N-25P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -30K <sub>2</sub> O

Teniendo en cuenta los factores económicos y los riesgos climáticos (sequía) se recomendaron dosis bajas de fertilización. Los agrónomos investigadores y el personal de extensión estimaron las dosis de fertilización en función de la respuesta prevista a la aplicación de P en cada sitio. Utilizando la información existente de experimentos pasados y considerando el presupuesto disponible y la capacidad técnica del personal local, se incluyeron un número limitado de tratamientos: (i) un control NK sin P, (ii) NPK con la roca fosfórica de Kodjari, (iii) NPK con la roca fosfórica parcialmente acidulada de Kodjari al 50 por ciento con ácido sulfúrico y, (iv) NPK con el superfosfato triple.

Un número limitado de experimentos de campo tipo «estación experimental» fueron establecidos en cada zona. Estos experimentos tenían un diseño estadístico y repeticiones apropiados así como supervisión técnica para obtener informaciones exactas que puedan servir de referencia para la zona. Además fue seleccionado un gran número de agricultores para participar en el programa de evaluación con los mismos tratamientos pero sin repeticiones. Estos experimentos en los campos de los agricultores fueron realizados para integrar la variabilidad de las prácticas de los agricultores. Johnstone y Sinclair (1991) estimaron que serían necesarias 40 repeticiones para lograr detectar con un 90 por ciento de probabilidad una diferencia entre dos fertilizantes que difieren en 10 por ciento en su disponibilidad de fósforo.

El Cuadro 19 presenta los datos de rendimiento para los dos tipos de experimento. Los valores promedio de eficiencia agronómica relativa de la roca fosfórica parcialmente acidulada fueron más altos que aquellos de la roca fosfórica en ambos tipos de experimentos para todos los cultivos. El arroz inundado produjo los resultados más

CUADRO 19

**Rendimientos de los cultivos y eficiencia agronómica relativa estimados para los resultados de los experimentos de campo en Burkina Faso**

Experimentos «en estación experimental»								
Tratamiento	Mijo		Sorgo		Maíz		EAR	
	kg/ha	EAR	kg/ha	EAR	kg/ha	EAR		
Control	596		916		2 219			
RF	698	68	1 006	39	2 464		35	
RFPA	728	88	1 103	81	2 839		88	
SFT	745		1 146		2 919			
Experimentos «en finca»								
Tratamiento	Mijo		Sorgo		Maíz		Arroz inundado	
	Promedio 70 campos kg/ha	EAR	Promedio 146 campos kg/ha	EAR	Promedio 54 campos kg/ha	EAR	Promedio 6 campos kg/ha	EAR
Control	440		671		1 263		2 036	
RF	598	54	911	50	1 976	77	2 348	80
RFPA	642	70	1 004	70	1 959	76	2 455	108
SFT	728		1 143		2 184		2 422	

Fuente: Frederick *et al.*, 1992; Lompo *et al.*, 1994.

altos, confirmando que el agua es un factor esencial para la efectividad de la roca fosfórica en las sabanas secas del África subsahariana. Una serie de experimentos adicionales evaluó la performance de la roca fosfórica de Kodjari. Su solubilidad en el ácido fórmico fue de 37 por ciento (Cuadro 8). Los valores de la eficiencia agronómica relativa basados en los valores L y la absorción de P fueron 29 y 32 por ciento, respectivamente (Cuadro 16). El valor de la eficiencia agronómica relativa promedio basado en los datos de rendimiento medidos en el campo para todo el país fue de 48 por ciento (Cuadro 19), variando desde 36 por ciento en el norte hasta 60 por ciento en el sur, en función de la precipitación pluvial.



## Capítulo 5

# Factores que afectan la eficiencia agronómica de las rocas fosfóricas, incluyendo un análisis de estudios de caso

En el Capítulo 4 se han revisado diversos enfoques y métodos para la evaluación de las rocas fosfóricas para la aplicación directa. Se ha indicado que el paso final en dicha evaluación es determinar su efectividad agronómica en el campo debido a la necesidad de integrar un rango de factores e interacciones en las condiciones prácticas de la producción agrícola. La información obtenida del programa de evaluación de campo debe ser interpretada para proporcionar las recomendaciones sobre la aplicación directa de las rocas fosfóricas a los agricultores. Esto requiere una comprensión correcta de la influencia de los diversos factores que afectan la disolución y la eficiencia agronómica de las rocas fosfóricas. Los factores principales son: la reactividad de las rocas fosfóricas, las propiedades del suelo, las condiciones climáticas (especialmente la lluvia) y los tipos de cultivos establecidos.

Este capítulo examina la influencia de estos factores sobre la eficiencia agronómica de las rocas fosfóricas. Además presenta estudios de caso sobre la utilización de las rocas fosfóricas en países seleccionados, los cuales representan las diferentes regiones geográficas, con la finalidad de ilustrar como estos factores y sus interacciones influyen el comportamiento agronómico de las rocas fosfóricas. Los países que se incluyen son: Madagascar y Malí (África), India (Sur de Asia), Indonesia (Sudeste de Asia), Nueva Zelanda (Oceanía) y Brasil y Venezuela (América del Sur). Si bien existe una gran variación en los tipos de suelo, las condiciones agroclimáticas y los cultivos establecidos en las regiones y los países, los factores fundamentales que influyen la eficiencia agronómica de las rocas fosfóricas son los mismos. Dado que ya han sido publicadas diversas revisiones completas sobre la utilización de las rocas fosfóricas (Khasawneh y Doll, 1978; Hammond *et al.*, 1986b; Bolan *et al.*, 1990; Sale y Mokwunye, 1993; Rajan *et al.*, 1996; Chien, 2003a), este capítulo enfoca el análisis de la importancia de los principales factores antes mencionados.

## FACTORES QUE AFECTAN LA EFECTIVIDAD AGRONÓMICA DE LAS ROCAS FOSFÓRICAS

### Reactividad de las rocas fosfóricas

La reactividad de las rocas fosfóricas es una medida de la tasa de disolución de esas rocas bajo condiciones estándar de laboratorio o en un suelo dado y bajo ciertas condiciones de campo (Rajan *et al.*, 1996). Esto excluye los cambios en la tasa de disolución causados por las variaciones en las propiedades del suelo y por los efectos de las plantas. La composición química y el tamaño de las partículas determinan la reactividad de las rocas fosfóricas. Las rocas fosfóricas de origen sedimentario son generalmente las más reactivas y, por lo tanto, adecuadas para la aplicación directa.

Las propiedades químicas que influyen la reactividad de las rocas fosfóricas son la estructura del cristal de fosfato (apatita) y la presencia de los minerales accesorios, especialmente el carbonato de calcio (Capítulos 3 y 8). Incrementando la sustitución de fosfato por carbonato en la estructura del cristal generalmente aumenta la reactividad

de las rocas fosfóricas. Esta sustitución da lugar a la disminución de las dimensiones del parámetro  $a$  y también al debilitamiento de la estructura cristalina de la apatita (Lehr y McClellan, 1972; Chien, 1977b). Las rocas fosfóricas más reactivas son aquellas que tienen una relación molar  $\text{PO}_4/\text{CO}_3$  de 3,5 a 5.

El carbonato de calcio es el mineral accesorio más abundante en las rocas fosfóricas. Como el carbonato de calcio es más soluble que los minerales fosfatados de mayor reactividad química (Silverman *et al.*, 1952), su disolución aumenta la concentración de calcio (Ca) y el pH en la superficie del mineral fosfatado, por lo que no es sorprendente que en algunos suelos el carbonato de calcio accesorio pueda reducir la tasa de disolución de la roca fosfórica (Anderson *et al.*, 1985; Robinson *et al.*, 1992). Sin embargo, bajo las condiciones de campo, la lixiviación y la absorción de P por la planta pueden extraer los iones Ca. El grado de remoción por la lixiviación puede variar de acuerdo a las condiciones de clima y de suelo y al modo de aplicación de la roca fosfórica. Para una aplicación en superficie (al voleo), el efecto del carbonato de calcio puede ser mínimo, aún si su contenido es alto, como ha sido demostrado con la roca fosfórica de Chatam Rise (Nueva Zelanda), que contiene 27 por ciento de carbonato de calcio libre (Rajan, 1987). Por otro lado, para una roca fosfórica incorporada, más del 15 por ciento de carbonato de calcio libre puede disminuir la efectividad de la roca fosfórica en un suelo alcalino encalado (Habib *et al.*, 1999).

Dado que las rocas fosfóricas son materiales relativamente insolubles, el tamaño de sus partículas tiene un efecto importante en su tasa de disolución en el suelo. Cuanto más fino es el tamaño de partícula, mayor es el grado de contacto entre la roca fosfórica y el suelo y, por lo tanto, más alta es la tasa de disolución de la roca fosfórica. Además, el incremento en el número de las partículas de roca fosfórica por unidad de peso de la roca aplicada aumenta la probabilidad para que los pelos radiculares absorbentes puedan interceptar las partículas de la roca fosfórica. La aplicación de una roca fosfórica finamente molida (normalmente a menos de 0,15 mm) favorece el aumento de la tasa de disolución de las rocas fosfóricas y de la absorción del P de la roca fosfórica en un suelo dado. Lamentablemente, debido a su naturaleza pulverulenta, la aplicación de materiales finamente molidos presenta dificultades prácticas.

Entre los varios métodos para medir la reactividad de las rocas fosfóricas (Capítulos 3 y 4), una prueba rápida para determinar su reactividad es extraer el fósforo de las rocas fosfóricas con soluciones químicas diluídas, por ejemplo el ácido cítrico al 2 por ciento, el ácido fórmico al 2 por ciento o el citrato de amonio neutro. El fósforo extraído es normalmente expresado como porcentaje del P total. En general, cuanto más grande es la extractibilidad química de las rocas fosfóricas en estas soluciones, mayor es su reactividad y, por lo tanto, su efectividad agronómica (Capítulo 4). El nivel de extractibilidad química que necesitan las rocas fosfóricas para ser agronómicamente efectivas varía con las condiciones de suelo y de clima, especialmente la precipitación pluvial. En Nueva Zelanda y en Australia, la extractibilidad química recomendada para las pasturas permanentes es de 30 por ciento del P total soluble en el ácido cítrico al 2 por ciento mientras que para los cultivos en la Comunidad Europea es de 55 por ciento soluble en el ácido fórmico al 2 por ciento. Los valores de P extraíble deben ser siempre considerados conjuntamente con el P total de las rocas fosfóricas.

Mientras que el P químicamente extraíble es un buen indicador de la reactividad de la roca fosfórica, algunas rocas fosfóricas pueden tener bajos índices de extractibilidad pero ser todavía agronómicamente efectivas. Por ejemplo, si bien la roca fosfórica de Mussoorie (India) tiene un 8 por ciento del P total como P extraíble en el ácido cítrico se ha encontrado que en algunos suelos puede ser agronómicamente tan efectiva como el superfosfato. El aumento de la efectividad agronómica es atribuido a la oxidación del sulfuro de hierro a ácido sulfúrico y a la acidulación localizada de la roca fosfórica. El sulfuro de hierro está presente en asociación íntima con los cristales de la apatita. Además, la roca fosfórica contiene carbono orgánico (1,14 por ciento) en su

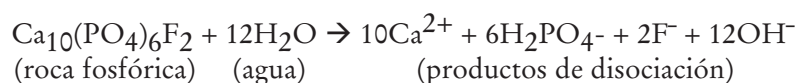
composición mineralógica. Esto probablemente mejora su porosidad interna y por lo tanto, la disolución del fósforo de la roca fosfórica (PPCL, 1982).

### Propiedades del suelo

Para que una roca fosfórica dada sea agronómicamente eficiente no solamente debe disolverse sino que también la roca fosfórica disuelta debe ser disponible para las plantas. Las propiedades del suelo que favorecen la disolución de la roca fosfórica son un pH ácido (menos de 5,5), una baja concentración de iones Ca en solución, un bajo nivel de fertilidad en P y un alto contenido de materia orgánica.

### Acidez del suelo

La disolución de la roca fosfórica puede expresarse mediante la ecuación:



Si bien la reacción arriba indicada corresponde a una roca fosfórica del tipo fluorapatita, se aplica a los otros minerales del grupo de las apatitas, que comprenden las rocas fosfóricas reactivas. Como indicado en la ecuación arriba, la disolución de la roca fosfórica resulta en la liberación de los iones hidroxilos en la solución. La neutralización de estos iones por la acidez del suelo permite que continúe el proceso de disolución de la roca fosfórica. En el caso de las rocas fosfóricas, donde los iones fosfato han sido sustituidos por los iones carbonato, se necesitan también iones hidrógeno para neutralizar los iones hidroxilos formados durante la liberación de los iones carbonato en la solución (Chien, 1977b). Cada ion carbonato ( $\text{CO}_3$ ) se une con dos iones hidrógeno para formar una molécula de agua y el gas dióxido de carbono. En ese caso, un suministro adecuado de los iones hidrógeno es de importancia capital para una solubilización continua de la roca fosfórica (Capítulo 4).

Los indicadores del suministro de iones hidrógeno son el pH del suelo y la acidez potencial (medida por titulación después de un desplazamiento con una base fuerte). El pH del suelo indica la magnitud del aporte de los iones hidrógeno en un momento dado mientras que la acidez titulable indica el suministro de los iones hidrógeno a más largo plazo. Ha sido encontrada una relación lineal positiva entre el pH inicial del suelo y la acidez titulable en los suelos australianos (Kanabo y Gilkes, 1987). De manera simple, la utilización de las rocas fosfóricas dependiendo de su reactividad es generalmente recomendada en los suelos de pH igual o inferior a 5,5. La disolución de la roca fosfórica disminuye con el aumento de pH del suelo hasta 5,5 pero la disminución es más rápida por encima de este nivel de pH del suelo (Bolan y Hedley, 1990; y Capítulo 4). Cuando se considera un gran número de suelos, la acidez potencial puede ser un mejor indicador de la disolución de la roca fosfórica (Babare *et al.*, 1997).

### Capacidad de intercambio catiónico y calcio y magnesio intercambiables

Para una disolución continua de la roca fosfórica es importante que otro producto mayor de la reacción, o sea el ion Ca, sea eliminado o que su concentración en la solución suelo sea mantenida a un nivel más bajo que en la lámina alrededor de la partícula de roca fosfórica, que se está disolviendo. Es posible obtener estas condiciones si hay suficientes sitios de cambio catiónico en el suelo disponibles para adsorber los iones Ca liberados de la roca fosfórica o si el Ca es lixiviado fuera de la zona de disolución de la roca fosfórica. Una medida de los sitios de cambio disponibles para la adsorción de Ca es la diferencia entre la capacidad de intercambio catiónico de los suelos y el Ca intercambiabile (Bolan *et al.*, 1990; Robinson y Syers, 1991).

Estudios recientes sugieren que un alto nivel de magnesio (Mg) intercambiabile en los suelos puede aumentar la disolución de la roca fosfórica (Perrot, 2003). Esta teoría

postula que como el Mg es retenido más fuertemente que el Ca, la presencia de Mg en los sitios de cambio del suelo puede bloquear la adsorción de Ca liberado de la disolución de la roca fosfórica y, por lo tanto, facilitar su remoción del sistema suelo-fertilizante. Esto tendría un efecto sobre el aumento de la disolución de la roca fosfórica. En suelos de bajo pH (menos de 5,5), el Ca y el Mg intercambiables serán definitivamente bajos (baja saturación de bases) y, por lo tanto, habrá una baja concentración de estos iones en solución.

La capacidad de intercambio catiónico de los suelos está también estrechamente relacionada con la textura del suelo. Los suelos arenosos generalmente tienen una baja capacidad de intercambio catiónico y por lo tanto no permiten un almacenamiento adecuado de los iones Ca liberados de la roca fosfórica. Esto conduce a una reducción en la disolución de la roca fosfórica y en su eficiencia agronómica. Los otros dos escenarios ocurren en las zonas con suficiente lluvia. El primero se presenta donde el Ca liberado puede ser eliminado de la zona cercana a las partículas de la roca fosfórica con un efecto positivo sobre la disolución de la roca fosfórica y en su eficiencia agronómica. El segundo ocurre donde la lluvia en exceso puede lavar el fósforo por debajo de la zona radicular de los cultivos y reducir la eficiencia agronómica de las rocas fosfóricas. Sin embargo, debido a su naturaleza de liberación lenta, las rocas fosfóricas son probablemente más benéficas que los fertilizantes solubles en agua bajo tales condiciones (Bolland *et al.*, 1995).

#### ***Concentración de P en la solución suelo y capacidad de retención de P***

Como la concentración de P en la solución suelo es normalmente muy baja (0,05-0,5 mg/l), esta tiene poca influencia sobre la disolución de la roca fosfórica. Sin embargo, ciertos informes indican que cuanto mayor es la capacidad de retención (adsorción) de fósforo de los suelos dando lugar a la reducción de P en la solución suelo, mayor será la disolución de la roca fosfórica (Chien *et al.*, 1980a). No es la capacidad de retención (adsorción) de P en sí lo que afecta la disolución de la roca fosfórica sino el número de sitios disponible para adsorber el P liberado de la roca fosfórica y, por lo tanto, mantener un nivel más bajo de la concentración de P en solución cerca de las partículas de la roca fosfórica.

Cuando se considera un gran número de suelos, la variación en la tasa de la disolución de la roca fosfórica en los suelos puede ser mejor explicada teniendo en cuenta la capacidad de retención de P de los suelos, además de la acidez titulable (Babare *et al.*, 1997). Si bien un aumento en la capacidad de retención de P puede favorecer la disolución de la roca fosfórica, su disponibilidad depende del nivel de P del suelo y de la cantidad de roca fosfórica adicionada.

Cuando se aplican bajas cantidades de roca fosfórica a los suelos extremadamente deficientes en P, los suelos adsorben fuertemente casi todo el P disuelto con un aumento muy pequeño de la concentración de P en la solución suelo. Esto resulta en un incremento muy bajo de la producción del cultivo (zona A de la Figura 12). A los niveles más altos de aplicación de P, a medida que la concentración de P en la solución aumenta por encima de la concentración límite para la absorción neta de P para las plantas, el rendimiento de los cultivos aumenta rápidamente (zona B de la Figura 12). (Rajan, 1973; Fox *et al.*, 1986). Los suelos de nivel fosfórico medio se hallan probablemente al comienzo de la zona B. En este caso, la roca fosfórica disuelta puede producir aumentos en el rendimiento de los cultivos. Esos suelos deben tener de preferencia un nivel de fertilidad fosfórica medio a alto para obtener beneficios inmediatos de la aplicación de la roca fosfórica en la dosis de mantenimiento. La dosis de mantenimiento es equivalente a la cantidad de P extraída por la cosecha del cultivo. En tales suelos, el P disponible para las plantas puede servir como P de arranque para el establecimiento y el crecimiento temprano del cultivo, lo que a su vez facilita para que las raíces utilicen la roca fosfórica más eficientemente. Esto es un efecto similar al del P soluble en agua sobre la efectividad

de las rocas fosfóricas (Capítulo 9). La zona C de la Figura 12 representa el «techo» de rendimiento alcanzado con los niveles más altos de aplicación de la roca fosfórica.

### *La materia orgánica del suelo*

Otra propiedad de los suelos que incrementa la disolución de la roca fosfórica y su disponibilidad para las plantas es la materia orgánica del suelo (Johnston, 1954b; Chien *et al.*, 1990b). Esto parece ser la resultante de (i) la alta capacidad de intercambio catiónico de la materia orgánica, (ii) la formación de complejos Ca-materia orgánica y, (iii) la presencia de ácidos orgánicos que disuelven la roca fosfórica y bloquean los sitios de retención (adsorción) del P en el suelo.

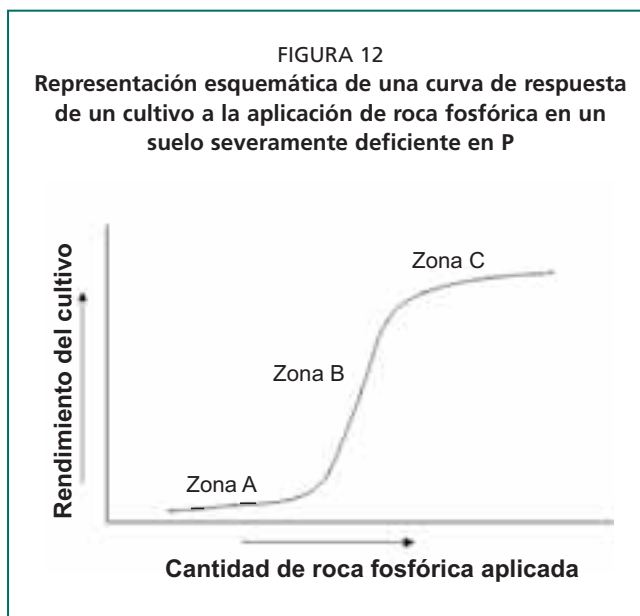
La capacidad de intercambio catiónico de la materia orgánica es más grande que la de los minerales de arcilla. Dependiendo de su contenido de arcilla, la capacidad de intercambio catiónico de los suelos minerales puede variar desde algunos hasta 60 cmol/kg mientras que la de la materia orgánica puede sobrepasar los 200 cmol/kg (Helling *et al.*, 1964). La alta capacidad de intercambio catiónico de la materia orgánica significa un aumento de la capacidad de retención de Ca por los suelos, lo que conduce a una mayor disolución de la roca fosfórica. Las fracciones húmicas y fúlvicas de la materia orgánica forman complejos con el Ca (Schnitzer y Skinner, 1969), que también pueden reducir la concentración de Ca en la solución, resultando así en una mayor disolución de la roca fosfórica. El contenido de la materia orgánica de los suelos tropicales es generalmente menor del 2 por ciento.

Cuando los cultivos anuales son cosechados, una gran proporción de los residuos de los sistemas radiculares y en algunos casos una parte de las plantas por encima de la superficie son dejados en el suelo. La decomposición de los residuos de las plantas en el suelo resulta en la producción de numerosos ácidos orgánicos tales como el oxálico, el cítrico y el tartárico (Capítulo 9). Estos ácidos pueden disolver la roca fosfórica mediante el aporte de los iones hidrógeno necesarios para neutralizar los iones hidroxilo producidos cuando la roca fosfórica se disuelve y la formación de complejos con los cationes especialmente el Ca de la roca fosfórica. Los iones orgánicos y el humus pueden también reducir la capacidad de retención de fósforo de los suelos mediante el bloqueo de los sitios de adsorción del P y la formación de complejos con los óxidos hidratados de hierro y aluminio, resultando en un aumento de la concentración de P en la solución suelo (Manickam, 1993).

Lógicamente, se supone que la incorporación de roca fosfórica durante la preparación de las tierras entre dos cultivos proporcionará un mayor beneficio a los agricultores. Tal práctica permitirá que los residuos de los cultivos en descomposición y cualquier estiércol animal que pudiera haberse aplicado, puedan aumentar la liberación del fósforo de la roca fosfórica. La aplicación temprana de la roca fosfórica también dejará tiempo para que la reacción de la roca fosfórica con el suelo y la liberación de una cierta cantidad de P ocurran antes de que sea establecido el siguiente cultivo.

### **Las condiciones climáticas**

La precipitación pluvial es el factor más importante que influencia la disolución de la roca fosfórica y su eficiencia agronómica. El aumento del agua en el suelo resultante



de la lluvia o del riego incrementa la disolución de la roca fosfórica (Weil *et al.*, 1994). El proceso es afectado por una rápida neutralización de los iones hidroxilo liberados y la remoción del Ca y otros productos de reacción fuera del área vecina a las partículas de la roca fosfórica. Un suministro adecuado de agua promoverá el crecimiento de las plantas y la absorción del fósforo por las raíces resultando en un aumento de la eficiencia agronómica de las rocas fosfóricas. En el caso de la aplicación de las rocas fosfóricas en superficie, experimentos realizados en Australia y en Nueva Zelanda indican que se requiere una precipitación pluvial anual de por lo menos 850 mm para que las rocas fosfóricas tengan una eficiencia agronómica semejante a los fertilizantes fosfatados solubles en agua (Hedley y Bolan, 1997; Sale *et al.*, 1997b). Sin embargo, este requerimiento de lluvia depende de las propiedades de los suelos.

Chien *et al.* (1980b) han informado que la temperatura dentro de un rango de 5 – 35 °C tiene un efecto mínimo o nulo sobre la solubilidad de las rocas fosfóricas y, por lo tanto, sobre su efectividad agronómica.

### Especies cultivadas

Las especies difieren en su demanda y forma de absorción de P así como en su capacidad para absorber el P de la solución suelo (Helyar, 1998; Baligar, 2001). Además, las especies muestran diferencias en su capacidad para adquirir formas de P de baja solubilidad que no están disponibles para otras plantas (Hocking *et al.*, 1997; Hinsinger, 1998; Hocking, 2001). Entre estas, algunas plantas pueden disolver y absorber los productos de la disolución de la roca fosfórica (Hinsinger y Gilkes, 1997). Por ejemplo, las pasturas permanentes, los árboles cultivados y los cultivos perennes de plantaciones requieren de un aporte constante de P durante un período prolongado. Debido a que las rocas fosfóricas se disuelven gradualmente en el suelo y aportan el fósforo a una tasa regular, la aplicación de las rocas fosfóricas como fertilizantes fosfatados a los cultivos antes mencionados va en aumento (Ling *et al.*, 1990; Pushparajah *et al.*, 1990; Chew, 1992). La alta eficiencia agronómica de las rocas fosfóricas obtenida con estos cultivos refleja parcialmente la naturaleza ácida de los suelos y la alta densidad del sistema radicular. La alta densidad de las raíces facilita la exploración intensiva del fósforo en un gran volumen de suelo debido al gran número de raíces finas por unidad de volumen de suelo.

Las leguminosas son particularmente adecuadas para la utilización de las rocas fosfóricas. Son efectivas en la disolución de la roca fosfórica y en la absorción de los productos de disolución debido a su demanda de Ca y al efecto acidificante de la fijación de nitrógeno en el suelo cerca del sistema radicular (rizósfera) (Ankomah *et al.*, 1995; Kamh *et al.*, 1999). Este efecto puede ser utilizado para mejorar la nutrición fosfórica de un cultivo intercalado o del cultivo subsiguiente en una rotación (Horst y Waschkiel, 1987; Vanlauwe *et al.*, 2000).

Algunas especies vegetales por ejemplo la colza, los lupinos y el guandul (*Cajanus cajan*) han sido estudiadas debido a su capacidad para secretar ácidos orgánicos que resultan en una mayor solubilización de la roca fosfórica (Jones, 1998; Hoffland, 1992; Adams y Pate, 1992; Ae *et al.*, 1990; Montenegro y Zapata, 2002). Estudios recientes (Chien, 2003a) indican que las rocas fosfóricas reactivas pueden tener aplicaciones potenciales aún en los suelos alcalinos con los cultivos que secretan ácidos orgánicos tal como la colza (Capítulo 9).

Los cultivos que poseen una alta capacidad de absorción de Ca son más indicados para la utilización de las rocas fosfóricas; por ejemplo, el mijo africano es más adecuado para el uso de la roca fosfórica seguido del mijo perla y del maíz (Flach *et al.*, 1987).

### Las prácticas de manejo

Las cuatro prácticas importantes de manejo que pueden influenciar la eficiencia agronómica de las rocas fosfóricas son: la localización de la roca fosfórica con relación a las plantas, la dosis de aplicación, la época de aplicación y la aplicación de cal (encalado).

### *Localización de la roca fosfórica*

Con la finalidad de obtener la máxima efectividad agronómica de las rocas fosfóricas, el producto debe ser preferentemente esparcido sobre la superficie del suelo e incorporado uniformemente en la capa superficial hasta la profundidad requerida. La profundidad de incorporación para los cultivos anuales está entre 100-150 mm. La incorporación facilita una mayor disolución de la roca fosfórica mediante el aumento del contacto entre el suelo y las partículas de roca. También favorece la absorción del fósforo por la planta proporcionando un mayor volumen de suelo enriquecido en P. Además, hay una mayor probabilidad de que una raíz encuentre una partícula de roca fosfórica en disolución.

### *Dosis de aplicación de la roca fosfórica*

La decisión sobre la dosis de aplicación de la roca fosfórica debe estar basada en el nivel fosfórico del suelo tal como haya sido indicado por el análisis de suelo (Capítulo 6; Perrot *et al.*, 1993; Perrot y Wise, 2000) y la tasa prevista de la disolución de la roca fosfórica y su disponibilidad para las plantas (Capítulo 9; Perrot *et al.*, 1996; Rajan *et al.*, 1996). El método de análisis de suelo a ser utilizado depende si el fertilizante fosfatado aplicado previamente fue una forma soluble en agua o una roca fosfórica.

Algunas directivas generales son:

- La aplicación de la roca fosfórica será probablemente útil en los suelos de nivel fosfórico medio. En estos suelos, la dosis mínima de aplicación debe ser tal que la cantidad prevista de fósforo liberado de la roca fosfórica no sea menor que la cantidad de P extraído del campo como producto cosechado más la cantidad de P retenido por los suelos en forma no disponible para los cultivos a los niveles cercanos a la producción máxima. Esto se conoce como dosis de mantenimiento fosfatado. En términos de cantidades absolutas, los suelos con una alta capacidad de retención de P requerirán mayores dosis de aplicación de fertilizante que los suelos de más baja retención de P. Esto tiene en cuenta el P retenido por los suelos en formas que no son disponibles para las plantas.
- En suelos de bajo nivel fosfórico, hay dos opciones: (i) llevar el nivel de fertilidad a un nivel medio de P mediante la aplicación de fertilizantes solubles en agua y luego hacer aplicaciones de roca fosfórica, o (ii) incorporar dosis altas de roca fosfórica (500-1 000 kg/ha) seguidas por una aplicación regular de la dosis de mantenimiento fosfatado.

### *Época de aplicación de la roca fosfórica*

En los suelos muy ácidos (pH menor de 5,5) con alta capacidad de retención de P, se recomienda la incorporación de la roca fosfórica inmediatamente antes de la siembra para minimizar la conversión del P disuelto a formas no disponibles para la planta (Chien *et al.*, 1990b). Sin embargo, en los suelos menos ácidos (pH 5,5-6) con baja capacidad de retención de P, se prefiere la incorporación de la roca unas 4 a 6 semanas antes de la siembra. Esto deja tiempo para la disolución de la roca fosfórica y su consiguiente disponibilidad para las plantas. Experimentos de laboratorio han mostrado que se necesitan de 4 a 8 semanas para que las rocas fosfóricas alcancen su máximo de solubilidad (Barnes y Kamprtah, 1975).

El uso de la roca fosfórica en cultivos de arroz inundado requiere una atención especial debido a que el pH del suelo generalmente aumenta con la inundación. Por esta razón, se recomienda aplicar la roca fosfórica al suelo unas dos semanas antes de la inundación (Hellums, 1991).

### *Aplicación de cal*

La incorporación de cal tiene un efecto negativo sobre la disolución de la roca fosfórica en el suelo debido a que incrementa la concentración de Ca en la solución y reduce la

acidez del suelo. Sin embargo, el encalado puede incrementar la disponibilidad del P disuelto para los cultivos mediante el incremento de pH del suelo y la reducción de la toxicidad de aluminio (Al). En vista de los efectos antes mencionados, cuando se hace un encalado para aumentar el pH del suelo hasta 5,5, la cal puede ser aplicada al mismo tiempo que la roca fosfórica pero preferentemente no mezclada con la roca fosfórica. Esto puede eliminar la toxicidad de aluminio y aún así promover la disolución de la roca fosfórica. Cuando el pH debe ser aumentado por encima de 5,5, el encalado debe ser hecho preferentemente unos seis meses después de la incorporación de la roca fosfórica de modo que su disolución no se reduzca drásticamente.

## ESTUDIOS DE CASO

### Malí

El sector agrícola de Malí está relacionado con un 80 por ciento de la población. Sin embargo, menos del 10 por ciento de los 2,7 millones de hectáreas de la tierra cultivada es fertilizada. El país importa 70 000 toneladas de fertilizante por año. Este fertilizante es aplicado mayormente a los cultivos rentables tales como el algodón, el arroz y el maní. Esta cantidad representa menos del 15 por ciento de los nutrientes extraídos por los cultivos. Las autoridades han tratado durante largo tiempo de mejorar esta situación, en particular utilizando la roca fosfórica local.

#### *Producción de roca fosfórica en Tilemsi*

Malí tiene un gran depósito de fosfato de origen sedimentario, localizado en el valle de Tilemsi, a unos 120 km al norte de Bourem. La firma Klockner Industrie Anlagen GmbH (1968) llevó a cabo un estudio detallado para su explotación. Las reservas fueron estimadas en 20 millones de toneladas con un contenido promedio de 27-28 por ciento de  $P_2O_5$ . La roca fosfórica con estratos delgados de cobertura es fácil de extraer. La explotación comenzó en 1976 como parte de un proyecto de cooperación técnica entre Malí y Alemania. Este incluyó la instalación de una planta de generación de electricidad, de máquinas de molienda, separación de partículas por centrifugación ciclónica y embolsado y facilidades de almacenamiento en Bourem. La capacidad de producción era de 36 000 toneladas por año. La producción real ha sido de unas 1 000 toneladas anuales en la década de 1970, 3 000 toneladas anuales en la década de 1980 y 10 000 toneladas anuales en la década de 1990, con una producción máxima de 18 560 toneladas en 1991. Desde entonces la producción ha sido irregular debido a problemas políticos en la región de la mina.

Con una producción de 10 000 toneladas anuales, el costo estimado de producción era de \$ EE.UU. 20,6 por tonelada de materia prima que llegaba a Bourem. Este precio aumentaba a \$ EE.UU. 78,5 por tonelada en la salida de la fábrica para el producto molido y embolsado y llegaba hasta \$ EE.UU. 157 por tonelada puesta en Sikasso, la zona principal de utilización, situada a unos 1 300 km al sur. El precio estimado del superfosfato triple librado en Sikasso era de \$ EE.UU. 273 por tonelada, lo que equivalía a \$ EE.UU. 0,60 por kg de  $P_2O_5$ , comparado con \$ EE.UU. 0,54 por kg de  $P_2O_5$  para la roca fosfórica de Tilemsi. En ese momento la diferencia de precios no era grande (Truong y Fayard, 1993).

Un análisis de los costos muestra que el costo de la molienda y embolsado en Bourem (\$ EE.UU. 57,9 por tonelada) era demasiado alto. Bourem está localizado en el desierto por lo que todos los componentes para la producción, incluyendo combustible, bolsas, piezas de repuesto, mantenimiento y mano de obra son muy costosos. El traspaso de la fábrica a Segou o Koulikoro, unos 1 100 km al sur podría generar importantes economías. Sería posible hacer la conexión a la red nacional hidroeléctrica y estarían disponibles muchas facilidades de una gran ciudad, especialmente la seguridad necesaria para asegurar una producción regular. El costo del transporte es también muy alto (\$ EE.UU. 78,5 por tonelada). Las embarcaciones tradicionales (de capacidad de 10-20



toneladas) pueden navegar todo el año en el río Níger. Casi el 95 por ciento de las mercaderías son transportadas de sur a norte y sólo un 5 por ciento en sentido inverso. En este caso, sería posible tomar ventaja de la disponibilidad del flete de retorno para transportar la roca fosfórica de Tilemsi a un costo más bajo.

### *Evaluación y uso de la roca fosfórica de Tilemsi*

La roca fosfórica de Tilemsi es una roca de reactividad mediana con un total de 29 por ciento de  $P_2O_5$ , del cual 61 por ciento es soluble en el ácido fórmico, por lo que sería adecuada para aplicación directa. Desde 1977, se han realizado estudios en condiciones controladas y naturales cubriendo las principales zonas agroclimáticas y los sistemas de cultivo en el país. Los resultados han mostrado que la efectividad de la roca fosfórica de Tilemsi depende en gran parte de la distribución de las lluvias. Su efectividad agronómica relativa es en promedio del 80 por ciento comparada con el superfosfato triple.

Los institutos de investigación recomiendan una aplicación anual de 100-200 kg/ha de roca fosfórica de Tilemsi o de 300-400 kg/ha para una rotación de cultivos. La roca fosfórica debe ser aplicada durante el barbecho e incorporada con una labranza tardía al final de la estación de lluvias. El gobierno de Malí ha tratado de promover el uso de la roca fosfórica de Tilemsi a través de los servicios nacionales y provinciales de extensión y de las compañías de desarrollo para los cultivos de algodón, maní, arroz y caña de azúcar. La única compañía que vende cantidades importantes de la roca fosfórica de Tilemsi es la «Compagnie Malienne pour le Développement des Textiles» (CMDT). Esta compañía tiene una importante función técnica, social y económica en la región.

Durante el período 1982-1987, el gobierno de Malí ha ejecutado un proyecto de fertilizantes mediante el Instituto de Economía Rural (IER) y el Centro Internacional para la Fertilidad del Suelo y el Desarrollo Agrícola (IFDC) en las cinco principales regiones pedoecológicas, a saber: Mopti (mijo), Kayes (maní), Segou (mijo), Koulikoro (sorgo) y Sikasso (algodón y maíz). Henao y Baanante (1999) hicieron un análisis completo de los resultados incluyendo una evaluación económica. El Cuadro 20 presenta un resumen de los resultados agronómicos. En los experimentos a mediano y largo plazo, la roca fosfórica de Tilemsi es prácticamente equivalente al superfosfato triple por unidad de  $P_2O_5$ .

### **Madagascar**

La situación del consumo de los fertilizantes en Madagascar es motivo de seria preocupación. El consumo total es de unas 15 000 toneladas/año para 1,7 millones de hectáreas de tierras cultivadas. La extracción de los nutrientes por los cultivos asciende a 205 000 toneladas ( $N + P_2O_5 + K_2O$ ). Esto significa que la tasa de reposición es de menos del 4 por ciento de los nutrientes extraídos. Por lo tanto, una fuerte explotación minera de los suelos está en marcha.

En Madagascar los depósitos de roca fosfórica son escasos con reservas estimadas en 600 000 toneladas. Estos se hallan en forma de materiales de guano depositados sobre arrecifes de coral distribuidos sobre el archipiélago de las islas Barren (Ratsimbazafy, 1975). Más de la mitad de estos depósitos (312 000 toneladas) están localizados en la isla de Andrano. Debido a que estos depósitos se hallan situados sobre arrecifes de coral, su explotación minera requiere cuidados especiales a fin de preservar la ecología del archipiélago. Esto limita la explotación a unas 10 000 toneladas por año y requiere el remplazo

CUADRO 20  
Rendimientos promedio de mijo, maní, sorgo, algodón y maíz obtenidos con la roca fosfórica de Tilemsi y el superfosfato, en Malí, 1982-1987

Fertilizante	Rendimiento de grano kg/ha/año	Productividad kg/ $P_2O_5$ /año
Control con aplicación de N y K	676	
Aplicación basal de roca fosfórica de Tilemsi 120 kg $P_2O_5$ /ha	1 110	3,6
Aplicación anual de superfosfato 30 kg $P_2O_5$ /ha	1 302	3,4

de la roca fosfórica extraída con la misma cantidad de suelo, que debe ser transportado desde la isla principal hasta los arrecifes de coral.

Las rocas fosfóricas de las islas Barren son reactivas. Por ejemplo, las solubilidades en el ácido fórmico de las rocas fosfóricas de Andrano, Andotra y Morombe exceden todas el 70 por ciento (en porcentaje del  $P_2O_5$  total). La eficiencia agronómica de estas rocas fosfóricas fue confirmada con un experimento en macetas donde las tres rocas fosfóricas fueron aplicadas a una dosis de 100 mg P per kilogramo de suelo en macetas con 100 g de un suelo andosol ácido (pH 4,3) de Madagascar. Se realizaron tres cosechas mensuales de la planta indicadora *Agrostis* sp. Los coeficientes de disponibilidad de estas rocas fosfóricas definidos como  $(P \text{ absorbido [RF]} - P \text{ absorbido [control]}) / (P \text{ absorbido [SFT]} - P \text{ absorbido [control]}) \times 100$ , fueron todos superiores a 100 después de una cosecha y durante las tres cosechas. Estos resultados muestran que las rocas fosfóricas de las islas Barren son muy reactivas y que son equivalentes o superiores al superfosfato triple en términos de efectividad agronómica (Truong *et al.*, 1982).

Dos ensayos de campo a largo plazo se llevaron a cabo en la meseta alta de Madagascar, donde el pH del suelo es 4,5 y la precipitación anual es de 1 200 mm. Estos ensayos incluyeron ocho y nueve años de maíz y arroz, respectivamente. La dosis de aplicación de la roca fosfórica fue de 400 kg  $P_2O_5$  por hectárea para el maíz y de 300 kg  $P_2O_5$  por hectárea para el arroz. Con el transcurso del tiempo se tuvieron respuestas marcadas en el rendimiento con respecto al tratamiento control. Estas ascienden a 25 000 kg de maíz en ocho años y 5 020 kg de arroz en nueve años (IFDC-CIRAD-ICRAF-NORAGRIC, 1996). La reactividad de la roca fosfórica y las condiciones favorables de suelo y de clima resultaron en una buena eficiencia de la roca fosfórica.

### *Costos de producción*

Madagascar no cuenta con instalaciones para la producción de fertilizantes y además, probablemente, la inversión en capital y personal de gestión para una fábrica pequeña no sería rentable. Es mejor alquilar los servicios de la fábrica de dolomita situada en Antsirabe para realizar la molienda y embolsado de la roca fosfórica. Los costos de la producción incluirán la extracción de la roca fosfórica de la isla Andrano y su transporte en barcas (llegando directamente sobre la playa) al puerto de Morondava, el transporte del suelo llevado de vuelta a Andrano, el transporte de la roca fosfórica en camión de Morondava a Antsirabey su molienda y embolsado en la fábrica. El costo estimado de la roca fosfórica en la salida de fábrica es de \$ EE.UU. 102/tonelada (\$ EE.UU. 0.51/kg  $P_2O_5$ ) en comparación a \$ EE.UU. 418/tonelada (\$ EE.UU. 0,92/kg  $P_2O_5$ ) para el superfosfato triple. Estos datos resaltan la rentabilidad de la roca fosfórica local de Andrano comparada con el fertilizante fosfatado soluble en agua, que es importado.

### **India**

En 1990/91, la India importó materias primas para la producción de fertilizantes por un costo de \$ EE.UU. 338 millones y ha fabricado fertilizantes por un valor de \$ EE.UU. 608 millones (Srinivasan, 1994). La mayor parte del fertilizante utilizado en el país es bajo la forma de N y el aumento en el consumo de los fertilizantes fosfatados no ha seguido el mismo ritmo que el de los fertilizantes nitrogenados. Por lo tanto, parece haber un desbalance en el uso de los nutrientes. Se estima que 46 por ciento de los suelos de India son bajos en P disponible, 52 por ciento de nivel medio y un 2 por ciento de nivel alto (Tandon, 1987). Sería necesario incrementar la aplicación de los fertilizantes fosfatados para obtener una productividad más alta.

La India importa cerca del 70 por ciento de la roca fosfórica necesaria para la producción de los fertilizantes fosfatados y todo el azufre elemental (S), principalmente para el uso en la industria de los fosfatos (Tandon, 1991). Existen depósitos de roca fosfórica de buen tamaño en diferentes partes del país: en Mussoorie (Uttar Pradesh),

en Purulia (Bengala Oeste), en Jhabua (Madya Pradesh), en Singhbhum (Bihar) y en Kasipatnam (Andra Pradesh). Si bien las reservas totales estimadas son de 130 millones de toneladas, cerca del 60 por ciento de los depósitos son de baja calidad y, por lo tanto, no son adecuados para la producción de superfosfato simple o triple (Jaggi, 1986). Entre las rocas fosfóricas de India, el depósito de Mussoorie (reservas estimadas de 45 millones de toneladas) y posiblemente el de Purulia (10 millones de toneladas) son considerados utilizables para la aplicación directa. Una roca fosfórica ígnea de baja reactividad (Jhamar-kotra), que no es probablemente adecuada para la aplicación directa, es también comercializada en el estado de Rajasthan por la firma Rajasthan State Mines and Minerals Ltd. bajo el nombre Raji Phos. Las reservas totales estimadas de roca fosfórica son de 77 millones de toneladas con contenidos de fósforo variando entre 5 y 16 por ciento. En 1998, la cantidad de roca fosfórica aplicada directamente ascendió a cerca de 11 000 toneladas de fósforo, o sea 0,6 por ciento del consumo total de 1,8 millones toneladas de fósforo.

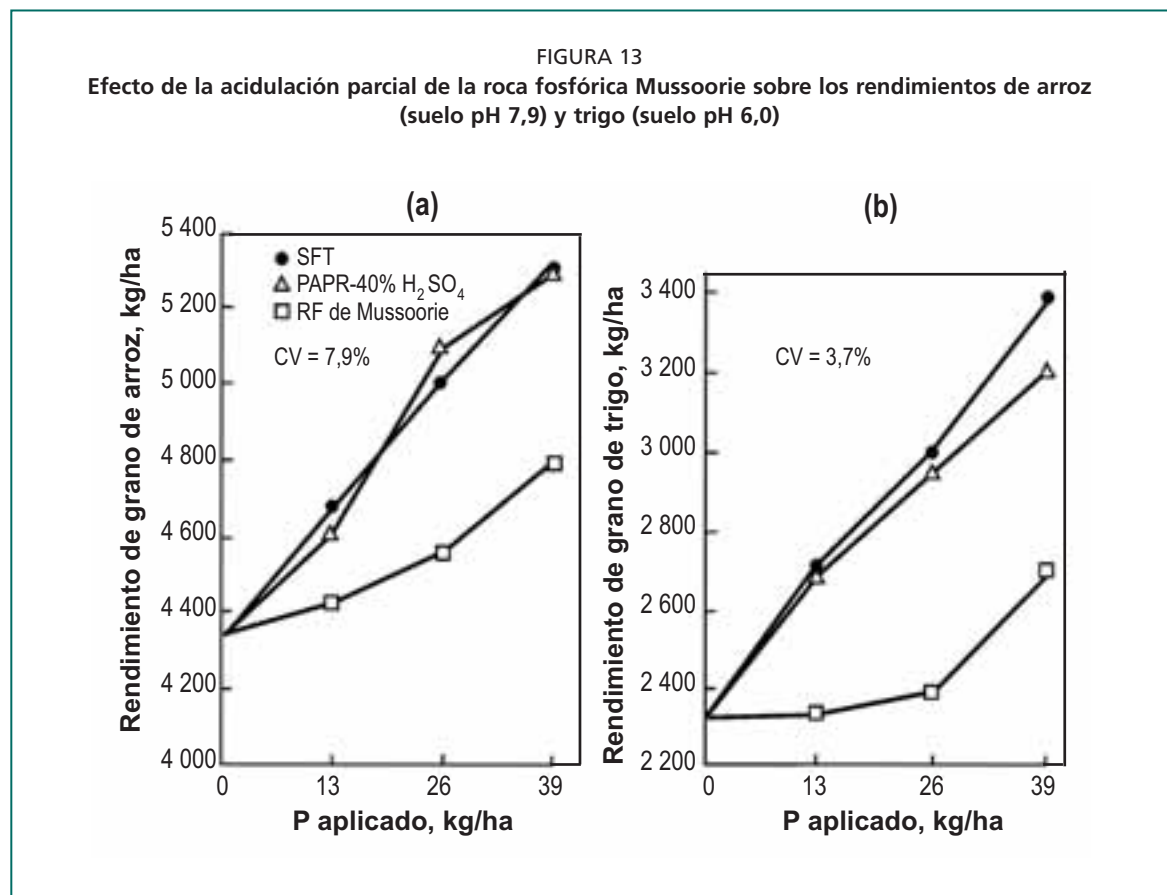
En India, los suelos ácidos ocupan unas 49 millones de hectáreas de tierras agrícolas. El pH del suelo es menor de 5,5 en 29 millones de hectáreas de estas tierras y el resto del área tiene valores de 5,6-6,5 (Tandon, 1987). Casi el 70 por ciento de las tierras cultivadas son de secano o temporal y pueden no ser adecuadas para la aplicación directa de la roca fosfórica. Como primera aproximación, asumiendo un requerimiento de 30 kg P /ha/año, la demanda de P para los suelos de pH de menos de 5,5 es de 234 000 toneladas de P anuales o sea 2,6 millones de toneladas de roca fosfórica anuales si se aplican en forma de la roca fosfórica local de Mussoorie.

Numerosos experimentos de campo han demostrado que la efectividad agronómica de la roca fosfórica de Mussoorie puede ser igual o semejante a la de los fertilizantes fosfatados solubles en los suelos de pH de menos de 5,5 en las plantaciones, las leguminosas, el arroz y el maíz cuando hay un buen abastecimiento de agua (Tandon, 1987; Poojari *et al.*, 1988). En los suelos con valores de pH más alto, puede ser necesario aplicar las rocas fosfóricas como rocas fosfóricas parcialmente aciduladas (Basak *et al.*, 1988; Chien and Hammond, 1988) (Figura 13) o en mezclas con los fertilizantes solubles en agua (Singaram *et al.*, 1995).

La roca fosfórica de Mussoorie, que es la más ampliamente utilizada en India, contiene 8-9 por ciento de P total, 1,14 por ciento de carbono orgánico y 4 por ciento de azufre como sulfuro. El P soluble en el ácido cítrico de la roca fosfórica finamente molida (tamaño de partículas menos de 0,15 mm) es de menos de 10 por ciento, o sea que posee cerca de un tercio de la reactividad de la roca fosfórica de Carolina del Norte no molida. Se considera que la oxidación del sulfuro a ácido sulfúrico y la reacción subsiguiente del ácido con la francolita incrementa la disolución de la roca fosfórica de Mussoorie y mejora su eficiencia agronómica. Se ha demostrado que la oxidación del S en los gránulos de roca fosfórica y S incrementa la disolución de la roca fosfórica (Rajan, 1983). Sin embargo, la roca fosfórica de Mussoorie contiene 15 por ciento de carbonatos libres, los que pueden neutralizar el efecto de la oxidación del azufre. Por otro lado, la roca fosfórica de Mussoorie contiene carbono orgánico en su composición mineralógica, lo que probablemente mejora su porosidad interna y, por lo tanto, la disolución del fósforo de la roca fosfórica.

#### *Evaluación de campo de la roca fosfórica de Mussoorie*

La roca fosfórica de Mussoorie fue agronómicamente tan eficiente como el superfosfato simple en un ensayo de campo con arroz inundado en un suelo ácido (pH cerca de 5,5) de Uttar Pradesh (Cuadro 21) (Mishra, 1975). En otro ensayo realizado en un suelo ácido de pH más alto (pH 5,8) la roca fosfórica de Mussoorie produjo 95 por ciento del rendimiento de maíz en relación a la aplicación de superfosfato simple mientras que la mezcla 1:1 fue tan buena como el superfosfato simple (PPCL, 1980). Considerando que el costo por unidad de P en la roca fosfórica de Mussoorie es 54 por ciento menor que



Fuente: Chien y Hammond, 1988.

el P en el superfosfato simple, se puede obtener un ahorro de 46 por ciento en el costo de la fertilización fosfatada del arroz inundado.

La roca fosfórica de Mussoorie también ha sido efectiva en los suelos con alto pH cuando hay un abastecimiento adecuado de agua de riego (Singaram *et al.*, 1995). Esta conclusión está basada en un experimento realizado durante más de tres estaciones para estudiar la respuesta de los cultivos a la aplicación directa y el efecto residual de los fertilizantes fosfatados. El suelo experimental fue un franco arcilloso, calcáreo, marrón-rojizo (ustropept típico) que contenía las arcillas caolinita y montmorillonita. El pH del suelo en agua fue de 8,02 y tenía menos de uno por ciento de materia orgánica. Los tratamientos incluían el superfosfato simple, la roca fosfórica de Mussoorie y una mezcla física de superfosfato simple y roca fosfórica de Mussoorie a tres dosis de aplicación y un control sin P. Se hicieron tres cultivos sucesivos: mijo africano, maíz y frijol mungo. Se aplicaron los fertilizantes al mijo y al maíz pero no al frijol mungo. Todos los cultivos fueron regados según sus necesidades.

CUADRO 21

**Rendimientos de arroz y maíz obtenidos con la roca fosfórica de Mussoorie, el superfosfato simple y una mezcla 1:1 de roca fosfórica de Mussoorie y superfosfato simple**

Tratamientos	Rendimiento de arroz (t/ha)				Rendimiento de maíz (t/ha)			
	Dosis (kg P/ha)							
	0	17,5	35	52	0	17,5	35	52
Superfosfato simple	2,0	2,2	2,6	2,8	5,2	6,6	9,0	10,9
Roca fosfórica de Mussoorie		2,3	2,5	2,9		6,3	8,2	10,5
Superfosfato simple- roca fosfórica de Mussoorie (1:1)						7,1	9,6	10,7

A partir de las curvas de respuesta de rendimiento se calcularon los valores de sustitución de los fertilizantes en estudio como la cantidad total de P aplicada como superfosfato simple que se necesita para producir 90 por ciento del rendimiento máximo dividida por el P total del fertilizante en estudio que se necesita para producir el mismo rendimiento. Una relación menor de 1 indica que el fertilizante en estudio es menos efectivo que el superfosfato simple. Los valores de sustitución de los fertilizantes para el mijo africano fueron 0,42 para la roca fosfórica de Mussoorie y 0,68 para la mezcla de superfosfato simple-roca fosfórica de Mussoorie. El valor del aporte de P de la roca fosfórica de Mussoorie fue 42 por ciento del valor del superfosfato simple. Sin embargo, dichos valores para el maíz fueron, respectivamente, de 1,25 y 1,39. El efecto residual de la roca fosfórica no solubilizada después de la primera aplicación puede haber contribuido a los valores de sustitución mayores de 1. Los rendimientos del frijol mungo para la dosis de fósforo que produjo el 90 por ciento del rendimiento máximo con una aplicación directa de superfosfato simple fueron 0,74 toneladas para la aplicación de superfosfato simple, 0,74 toneladas para la mezcla superfosfato simple-roca fosfórica de Mussoorie y 0,82 toneladas para la roca fosfórica de Mussoorie.

El análisis económico (Cuadro 22) muestra que las ganancias netas fueron marginalmente mejores para la aplicación de la roca fosfórica de Mussoorie y de la mezcla superfosfato simple-roca fosfórica de Mussoorie que para la aplicación de superfosfato simple (Singaram *et al.*, 1995).

Los cálculos arriba indicados no tienen en cuenta el valor nutricional del componente azufre del superfosfato simple. El valor atribuido al azufre depende del nivel de azufre de los suelos; es necesario tener en cuenta que no todos los suelos necesitan una aplicación de azufre. La aplicación inicial de la roca fosfórica resultó en una reducción del rendimiento para el primer cultivo. Luego, con aplicaciones posteriores a los cultivos siguientes podrán haber mayores ganancias. Sin embargo los beneficios financieros no son particularmente significativos para los agricultores. No obstante, el uso de las rocas fosfóricas locales puede tener como consecuencia importantes beneficios financieros para todo el país. Esto resulta del ahorro en divisas debido a que las rocas fosfóricas locales sustituyen las importaciones. Tal vez un subsidio podría ser necesario para estimular a los agricultores a utilizar las rocas fosfóricas.

## Indonesia

Indonesia ha aplicado rocas fosfóricas por largo tiempo a las plantaciones tales como el caucho, la palma aceitera, el cocotero, el cacao, el café y el té. La demanda estimada es de 500 000 toneladas anuales pero el consumo es de unas 50 000 – 100 000 toneladas anuales. La mayor parte de la roca fosfórica proviene de Argelia, Jordania, Marruecos, Islas Christmas y Túnez.

Los recursos locales de roca fosfórica consisten de numerosos depósitos de guano fosfatado y de calcáreo fosfatado situados en cuevas. La Dirección de los Recursos Minerales estimó que las reservas totales eran de 700 000 toneladas (Harjanto, 1986). La calidad de estas rocas fosfóricas es muy buena con un contenido de  $P_2O_5$  total variando entre 28-39 por ciento y el P soluble en el ácido fórmico de 54 a 80 por ciento del  $P_2O_5$  total. Por lo tanto, se considera que estas rocas fosfóricas son adecuadas para la aplicación directa.

Un consorcio ha estudiado los depósitos de fosfato en las regiones de Ciamis y Tuban en Java occidental (BPPT-BRGM-CIRAD-TECHNIFERT-SPIE BATIGNOLLES, 1989). El consorcio ha informado que existen reservas estimadas

CUADRO 22  
Beneficios netos de los fertilizantes fosfatados aplicados a mijo africano y maíz y de su efecto residual evaluado con frijol mungo

Fertilizante	Mijo africano	Maíz	Frijol mungo	Total
	Beneficio neto (\$ EE.UU./ha)			
Superfosfato simple	438	487	315	1 240
Superfosfato simple + roca fosfórica de Mussoorie	438	495	316	1 249
Roca fosfórica de Mussoorie	435	496	346	1 277

de 3 millones de toneladas de roca fosfórica en la región de Ciamis de Java occidental. En realidad hay muchos tipos de depósitos relativamente nuevos que se han solubilizado y recristalizado en el calcáreo. Los fosfatos se hallan como incrustaciones de crandalita y de whittokita en suelos arcillosos, que son productos de la erosión del mismo calcáreo. Muestras provenientes de este estudio han sido empleadas en experimentos de maceta y de campo.

#### *Comportamiento de las rocas fosfóricas de Ciamis*

Se realizó un experimento en maceta para comparar tres rocas fosfóricas (Malang, Bluri y Senori) de la región de Ciamis con el superfosfato triple como fertilizante de referencia y todos aplicados a la misma dosis de 100 mg P por kilogramo de un suelo ácido (pH 4,5) podzólico de Singkut, Sumatra. Todos los tratamientos, incluyendo un control sin P, tenían cinco repeticiones. Dos plantas indicadoras (*Agrostis* sp. y soya) fueron sembradas en secuencia en macetas de 150 g de suelo para medir los efectos directo y residual respectivamente. Los coeficientes de eficiencia agronómica relativa fueron calculados como  $EAR = [(\text{rendimiento de roca fosfórica} - \text{rendimiento del control}) / (\text{rendimiento del superfosfato triple} - \text{rendimiento del control})] \times 100$ . La eficiencia agronómica relativa de las tres rocas fosfóricas fue superior al 100 por ciento para los rendimientos de *Agrostis* mientras que las rocas fosfóricas de Malang y Bluri tuvieron eficiencias por encima de 100 para los rendimientos de soya. Se llevó a cabo también, por separado, un estudio de incubación con las mismas rocas fosfóricas en el mismo suelo. Las rocas fosfóricas aumentaron el P disponible al mismo nivel que el superfosfato triple. También aumentaron el Ca intercambiable y disminuyeron el Al intercambiable en mayor grado que el superfosfato triple. Las rocas fosfóricas de Ciamis fueron tan efectivas como el superfosfato triple en estos estudios.

Un ensayo de campo con cinco cultivos consecutivos se llevó a cabo durante dos años en un ultisol abandonado (pH 4,3) en la provincia de Kalimantan Sur. El objetivo era evaluar la performance de la roca fosfórica de Ciamis con respecto a otras rocas fosfóricas de África del Norte y África Occidental usando el superfosfato local (SP 36) soluble en agua como fertilizante de referencia (Sri Adiningsih y Nassir, 2001). Los fertilizantes fosfatados fueron aplicados a una dosis única de 300 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por hectárea y se incluyó un control sin P. La roca fosfórica de Ciamis y la roca fosfórica de Gafsa (Túnez) de alta reactividad fueron semejantes en efectividad agronómica para el primer cultivo y los cuatro subsiguientes (Cuadro 23). El comportamiento de las otras rocas fosfóricas mejoró con los cultivos sucesivos.

Un simple análisis económico indicó que una alta aplicación de los fertilizantes fosfatados incrementó las ganancias netas del agricultor. Este incremento fue de \$ EE.UU. 1 050 para el superfosfato soluble en agua y de \$ EE.UU. 1 264 para las rocas fosfóricas molidas (Sri Adiningsih y Nassir, 2001). Esto demuestra que las rocas fosfóricas locales pueden ser utilizadas ventajosamente para la producción de los cultivos alimenticios, en particular para la rehabilitación de los suelos degradados abandonados por los agricultores.

CUADRO 23

**Efectividad agronómica relativa (EAR) de las rocas fosfóricas aplicadas a los cultivos en un Ultisol (Tepic Hapludult), Pelaihari, Kalimantan**

Fuentes de roca fosfórica	Maíz 1er cultivo	Arroz de secano 2do cultivo	Frijol caupí 3er cultivo	Maíz 4to cultivo	Arroz de secano 5to cultivo	Promedio 5 cultivos
OCP, Marruecos	47	104	150	121	128	110
Gafsa, Túnez	114	105	162	113	108	119
Djebel-Onk, Argelia	25	98	162	130	133	109
ICS, Senegal	69	99	112	118	95	98
OTP, Togo	41	89	50	130	120	86
Ciamis, Indonesia	106	114	212	90	122	128

Se instaló una planta piloto en Ciamis con una capacidad de 10 000 toneladas por año. En 1999 el costo estimado de producción, incluyendo la extracción, molienda, secado y embolsado era de \$ EE.UU. 50 por tonelada de producto comercial conteniendo 25 por ciento de  $P_2O_5$  (\$ EE.UU. 0.20/kg  $P_2O_5$ ). Los precios de mercado del fosfato soluble en agua (SP 36 con 36 por ciento  $P_2O_5$ ) y de la roca fosfórica importada (Gafsa con 31 por ciento  $P_2O_5$ ) eran de \$ EE.UU. 171 y \$ EE.UU. 114 por tonelada (\$ EE.UU. 0,47 y \$ EE.UU. 0,38/kg  $P_2O_5$ ) respectivamente. Se ha acordado la formación de una empresa conjunta con una compañía japonesa para iniciar la explotación de la mina. La demanda está aumentando pero el problema es asegurar un aprovisionamiento regular del producto comercial.

### Nueva Zelandia

La explotación pastoral basada en pasturas permanentes, mezcla de raigrás perenne y trébol blanco constituye cerca del 90 por ciento de la agricultura en Nueva Zelandia para la producción de productos lácteos, ganado lanar y vacuno y de venados. Mientras que las plantas forrajeras en las pasturas tienen como recurso importante el N atmosférico fijado por el trébol, el P debe ser aplicado como fertilizante. Las pasturas permanentes son particularmente adecuadas para el uso de las rocas fosfóricas debido a que (i) necesitan un aporte regular de P durante un largo período, (ii) poseen una alta densidad de raíces y, (iii) las leguminosas (trébol blanco en este caso) son utilizadoras eficientes de las rocas fosfóricas debido a su afinidad por el Ca y al efecto acidificante de la fijación de N en la rizósfera. Además, la mayoría de los suelos de Nueva Zelandia son ligeramente ácidos (pH 5-6) con regímenes de humedad adecuados (más de 850 mm de lluvia anuales); ambos factores favorecen la disolución de la roca fosfórica (Hedley y Bolan, 2003). Cerca del 10 por ciento de los fertilizantes fosfatados son aplicados como rocas fosfóricas reactivas (unas 142 000 toneladas de roca fosfórica reactiva) y se informa que el uso de las rocas fosfóricas aumenta cada año cerca del uno por ciento del mercado de fosfato (Quin y Scott, 2003). Como la aplicación de la roca fosfórica es permitida bajo las prácticas de la agricultura orgánica existe un incentivo para utilizar la roca fosfórica en esas situaciones específicas.

La primera serie de ensayos para evaluar las rocas fosfóricas como fertilizantes fosfatados comenzó en 1932 (Hedley y Bolan, 1997). Desde mediados de la década de 1970 los estudios sistemáticos han incluido numerosos ensayos de campo, experimentos de invernadero y pruebas de laboratorio (Hedley y Bolan, 2003).

Los resultados de los ensayos de campo muestran que podría haber un retraso antes de que las rocas fosfóricas comiencen a ser efectivas y puede ser necesario esperar unas 4 a 6 aplicaciones anuales antes de que sean tan efectivas como el superfosfato triple. En estos ensayos, las rocas fosfóricas fueron aplicadas en superficie y no incorporadas al suelo. El retraso puede ser atribuido al tiempo que se requiere para que la roca fosfórica sea incorporada al suelo mediante el efecto de la actividad de las lombrices, la lluvia y otros elementos ambientales y para que el fósforo de la roca fosfórica se disuelva. Además, como la concentración de P cerca de las partículas de la roca fosfórica es de cerca de 4 mg/litro (Watkinson, 1994b), la roca fosfórica necesitará más tiempo que el superfosfato simple para que el flujo de P se difunda dentro del volumen de suelo y sea absorbido por las plantas. Varios estudios han mostrado que aún después de cuatro aplicaciones anuales de la roca fosfórica de Carolina del Norte la concentración de P en la solución no aumenta significativamente por debajo de los 20 mm de profundidad en un suelo de alta capacidad de retención de P (Rajan, 2002).

La disminución en la producción absoluta de materia seca durante los primeros años puede ser significativa en los suelos de baja fertilidad fosfórica. Sin embargo en suelos de fertilidad media a alta esta disminución puede ser inferior al 10 por ciento (Quin y Scott, 2003). Esto es debido a que se puede esperar un pequeño aumento en la producción de las pasturas resultante de la aplicación de fertilizante fosfatado en

estos sitios. En Nueva Zelanda, la roca fosfórica reactiva se aplica mayormente en mezcla con el P soluble en agua con el fin de incrementar su eficiencia agronómica (Capítulo 9).

En la actualidad, un kilogramo de P como roca fosfórica reactiva cuesta \$ EE.UU. 0,87 mientras que como superfosfato simple cuesta \$ EE.UU. 1,07, si el suelo no requiere azufre. En ese caso el fosfato de la roca fosfórica reactiva es 20 por ciento más barato. Una estrategia promisorio es promover la aplicación de la roca fosfórica reactiva con P soluble, lo que probablemente resultará en el mismo nivel de eficiencia agronómica que la aplicación de P soluble (Capítulo 9). Las economías hechas utilizando la roca fosfórica reactiva serán menores si se considera el valor del S en los fertilizantes. En esas condiciones, la rentabilidad de la roca fosfórica reactiva con respecto a los fertilizantes solubles dependerá del requerimiento de S de los suelos, además de los factores de medio ambiente y de manejo (Sinclair *et al.*, 1993a; Rajan *et al.*, 1996). Un incentivo específico para el uso de la roca fosfórica reactiva en Nueva Zelanda está relacionado a su posibilidad de uso en la agricultura orgánica.

### América Latina

La aplicación directa de la roca fosfórica ha recibido considerable atención en América Latina durante los últimos 20 años. Se han realizado experimentos para evaluar el potencial agronómico y económico de las rocas fosfóricas locales encontradas en varios países. El objetivo principal ha sido determinar si las rocas fosfóricas locales podrían ser utilizadas directamente después de la molienda o modificadas para producir las rocas fosfóricas parcialmente aciduladas o sometidas a altas temperaturas para producir los termofosfatos y así reducir la dependencia de los países respecto a los fertilizantes fosfatados solubles en agua que son en su mayoría importados (Casanova, 1995). Los resultados han mostrado que la utilización de ciertas fuentes de rocas fosfóricas es recomendable bajo ciertas condiciones (Casanova, 1998; Lopes, 1998; Besoain *et al.*, 1999).

Las sabanas en las zonas tropicales y subtropicales son la principal frontera agrícola de América Latina. Los suelos, principalmente ultisoles y oxisoles, son altamente edafizados, de baja fertilidad, muy ácidos y con una alta capacidad de retención de P (Von Uexkull and Mutert, 1995). Por consiguiente, el uso de los fertilizantes fosfatados es importante para mantener e incrementar la productividad agrícola de estos suelos (Casanova, 1992). Esta situación conjuntamente con las grandes reservas de rocas fosfóricas (especialmente en Brasil y Venezuela) y los altos costos de los fertilizantes importados han promovido una diversificación en la producción de los fertilizantes fosfatados empleando las fuentes de rocas fosfóricas en estos países (Casanova, 1995). Se han propuesto diversas estrategias para un uso más racional de los fertilizantes fosfatados. Los siguientes estudios de caso en Venezuela y Brasil ilustran como las rocas fosfóricas locales pueden ser modificadas y utilizadas eficazmente por los agricultores.

### Venezuela

Con 2 650 millones de toneladas, Venezuela ocupa el tercer lugar entre las reservas más grandes de rocas fosfóricas en América Latina, después de México y Perú. El contenido de  $P_2O_5$  total varía de 20 a 27 por ciento y la solubilidad del  $P_2O_5$  en el ácido cítrico al 2 por ciento es de baja a media utilizando el criterio de solubilidad de Hammond y León (1983).

Las recomendaciones de manejo para la aplicación directa de las rocas fosfóricas molidas o modificadas han sido desarrolladas durante los últimos 20 años para cultivos anuales y permanentes para las diferentes condiciones de suelo y de clima (Casanova, 1992; Casanova *et al.*, 1993). Los requerimientos de P para estos cultivos conjuntamente con los métodos y dosis de aplicación y sus efectos residuales han



sido determinados mediante experimentos de laboratorio, invernadero y campo así como evaluaciones comerciales de estas fuentes de P (Casanova *et al.*, 2002b). Este trabajo ha proporcionado las bases para la instalación de una fábrica de fertilizantes para producir roca fosfórica granulada parcialmente acidulada con una capacidad de 150 000 toneladas/año. La roca fosfórica es parcialmente acidulada al 60-75 por ciento con ácido sulfúrico producido localmente (Capítulo 10).

Un cierto número de factores favorecen la utilización de la roca fosfórica parcialmente acidulada producida en la fábrica de Venezuela. Cerca del 75 por ciento de los suelos en el país son ácidos y las condiciones climáticas son principalmente tropicales con precipitaciones promedio de unos 1 000 mm anuales. La superficie cubierta con cultivos anuales es de un millón de hectáreas y la de los cultivos permanentes de 6,5 millones de hectáreas (Comerma y Paredes, 1978).

Una reciente evaluación comercial de los resultados agronómicos y económicos del uso de roca fosfórica parcialmente acidulada en la rehabilitación de las pasturas degradadas en el estado de Monagas ha encontrado que esta práctica es exitosa. La evaluación incluyó 30 explotaciones agrícolas utilizando un sistema mixto de producción (carne y leche) basado en pasturas altamente degradadas de *Brachiaria brizantha*. La degradación de las pasturas ocurrió por el sobrepastoreo y las bajas aplicaciones de fertilizantes en estos suelos que son deficientes en N y P. La pastura degradada crecía unos 20-25 cm y cubría un 30-40 por ciento de la superficie del suelo. Los rendimientos de materia seca eran de 300 kg/ha/cosecha y el forraje contenía 2-3 por ciento de proteína cruda y era de mala digestibilidad. El promedio de producción de leche por animal era de 3 a 5 litros/día.

Estas pasturas degradadas fueron renovadas con una aplicación de 200 kg por hectárea de roca fosfórica parcialmente acidulada mezcladas con 100 kg de urea y con la siembra de 3 kg/ha de semilla de *Stylosanthes capitata* al comienzo de la estación de lluvias. El Cuadro 24 muestra los resultados obtenidos con esta práctica. La concentración de proteína cruda de la pastura aumentó a 6 por ciento y las concentraciones de fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg), hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn) y manganeso (Mn) aumentaron a niveles de suficiencia mientras que la producción de leche por animal aumentó a 8 litros/día en un rebaño de 100 cabezas. Después de un año, el peso de los animales se había incrementado de 350 kg en el sistema de pasturas degradadas a 470 kg en el sistema mejorado «roca fosfórica parcialmente acidulada-urea-*Stylosanthes capitata*». El aumento de las ganancias era de \$ EE.UU. 90/día para la producción de leche y de \$ EE.UU. 15 600 para la producción de carne para un rebaño de 100 cabezas.

La rehabilitación de una pastura degradada con el método tradicional utilizando labranza, fertilización con fertilizantes solubles, herbicidas, siembra y el tiempo requerido para que la pastura cubra el suelo cuesta \$ EE.UU. 462/ha en comparación con \$ EE.UU. 77/ha para el sistema basado en la roca fosfórica parcialmente acidulada (Cuadro 24). Todos los agricultores mejoraron sus pasturas e incrementaron su producción de leche y de carne así como sus ganancias económicas con un sistema de producción sostenible basado en la tecnología de la roca fosfórica parcialmente acidulada.

El impacto social radica en que los agricultores cuentan ahora con un

CUADRO 24

**Comparación entre una pastura renovada utilizando el tratamiento «roca fosfórica parcialmente acidulada-urea-*Stylosanthes capitata*» y una pastura tradicional degradada. Estado Monagas, Venezuela**

Parámetro medido	Pastura renovada	Pastura degradada
Rendimiento de pasto (ton MS/corte)	1,8	0,3
Composición del forraje (en base MS)		
Proteína bruta (%)	6,4	3,0
P (%)	0,15	0,08
K (%)	1,02	0,50
Ca (%)	0,26	0,20
Mg (%)	0,46	0,25
Fe (mg/kg)	332	214
Cu (mg/kg)	5	1
Zn (mg/kg)	45	37
Mn (mg/kg)	154	83
Producción lechera (litros/animal/día)	8	5
Costo de rehabilitación (\$EE.UU./ha)	77	462

CUADRO 25

Indices de eficiencia agronómica\* de los fertilizantes fosfatados en un oxisol arcilloso de Brasil central, estimados en base a los datos de absorción de fósforo durante cinco años con cultivos anuales, seguidos de tres años con la gramínea *Andropogon* sp.

Fertilizante fosfatado	200 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha			800 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha		
	Cultivos anuales	Andropogon	Total	Cultivos anuales	Andropogon	Total
SFT	100	100	100	100	100	100
RF de Gafsa	93	110	104	106	106	106
Termo-Fosfato Mg	92	142	113	110	119	114
Termo-Fosfato IPT	45	84	60	88	98	92
RF de Araxá**	27	69	41	47	74	58
RF de Patos**	45	81	59	56	91	70
RF de Catalao**	8	36	17	26	43	33

\* IEA (%) = [(rendimiento tratamiento roca fosfórica) - (rendimiento control)] / [(rendimiento tratamiento superfosfato triple) - (rendimiento control)] x 100.

\*\* Rocas fosfóricas de Brasil.

fertilizante fosfatado disponible en más de 175 distribuidores de fertilizantes en el país a un precio competitivo de \$ EE.UU. 49/tonelada comparado con el superfosfato triple importado soluble en agua (\$ EE.UU. 148/ tonelada). Ambos fertilizantes son semejantes en eficiencia agronómica y económica.

### Brasil

Brasil tiene reservas de 376 millones de toneladas de roca fosfórica, cuyo contenido de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total varía entre 24 y 38 por ciento. Sin embargo, la solubilidad del P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> en el ácido cítrico al 2 por ciento para las rocas fosfóricas principalmente ígneas es baja (2,6 a 4,8 por ciento). Brasil utiliza unas 4 600 toneladas de P por año (casi el 3 por ciento del consumo mundial). Las estrategias adoptadas en Brasil han sido o bien importar fertilizantes solubles en agua o rocas fosfóricas reactivas o bien tratar las rocas fosfóricas locales a altas temperaturas en una mezcla con escorias básicas para producir los termofosfatos (Cuadro 25).

Un estudio de Lopes (1998) informa sobre un experimento realizado en un oxisol arcilloso de pH 4,2 que había recibido 2,2 toneladas de cal por hectárea. Diversos fertilizantes fosfatados incluyendo las rocas fosfóricas locales (Araxa, Patos y Catalao) fueron aplicados en superficie en el primer año a las dosis de 200 y 800 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por hectárea. Los resultados (Cuadro 25) muestran que las rocas fosfóricas de Brasil tienen un bajo índice de eficiencia agronómica. Durante cinco años de cultivos anuales el índice de eficiencia agronómica de todas las rocas fosfóricas era inferior al 50 por ciento para ambas dosis de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, excepto la roca fosfórica de Patos a 800 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por hectárea. Con la gramínea *Andropogon* sp. cultivada durante 3 años después de los cultivos anuales, el índice de eficiencia agronómica fue considerablemente más alto, excepto para la roca fosfórica de Catalao. El alto índice de eficiencia agronómica para la roca fosfórica de Gafsa es un buen indicador de que este producto es una fuente eficaz de P en estos suelos ácidos.

Lopes (1998) también describe tecnologías desarrolladas a partir de una serie de estudios de laboratorio e invernadero y experimentos de campo, las que han transformado millones de hectáreas de tierra no productiva en tierras cultivadas de alta productividad. Las mejores estrategias desarrolladas para formar un capital de P en estos suelos son:

- A fin de obtener rendimientos adecuados durante cuatro años, una aplicación de 1,5-2 kg de P/ha por cada uno por ciento de arcilla es esparcida en superficie como fertilizante fosfatado soluble en agua, termofosfato o una roca fosfórica altamente reactiva según las necesidades de los cultivos. Esta estrategia fue ampliamente adoptada para incorporar extensas áreas de tierras a la producción de cultivos

en las décadas de 1970 y 1980. La estrategia fue combinada con subsidios y financiamiento adecuado con créditos a baja tasa de interés. Esta práctica se utiliza todavía en la actualidad pero sin subsidios.

- A fin de obtener rendimientos adecuados durante seis años, las aplicaciones anuales principalmente de los fertilizantes fosfatados solubles en agua pero también los termofosfatos y las rocas fosfóricas altamente reactivas son hechas en banda según las necesidades de los cultivos. Además se debe aplicar cada año un pequeño exceso (8-10 kg P por hectárea). Las operaciones de labranza subsiguientes y el efecto residual del fertilizante fosfatado resultan en un incremento gradual del P del suelo. Los agricultores de escasos recursos económicos con financiamiento insuficiente para utilizar grandes cantidades de P como inversión de capital tienen la tendencia de utilizar esta alternativa, que está más de acuerdo con la política agrícola actual de Brasil.

El estudio de Lopes (1998) enseña que estas estrategias de manejo desarrolladas en la región del Cerrado de Brasil han permitido la incorporación de millones de hectáreas a los sistemas de producción agrícola-ganadera. En conclusión, estos resultados demuestran que los suelos tropicales ácidos, altamente edafizados y de bajo contenido de nutrientes pueden ser tan productivos como los mejores suelos del mundo si se utiliza tecnología apropiada.

## Capítulo 6

# Análisis del suelo para la aplicación de roca fosfórica

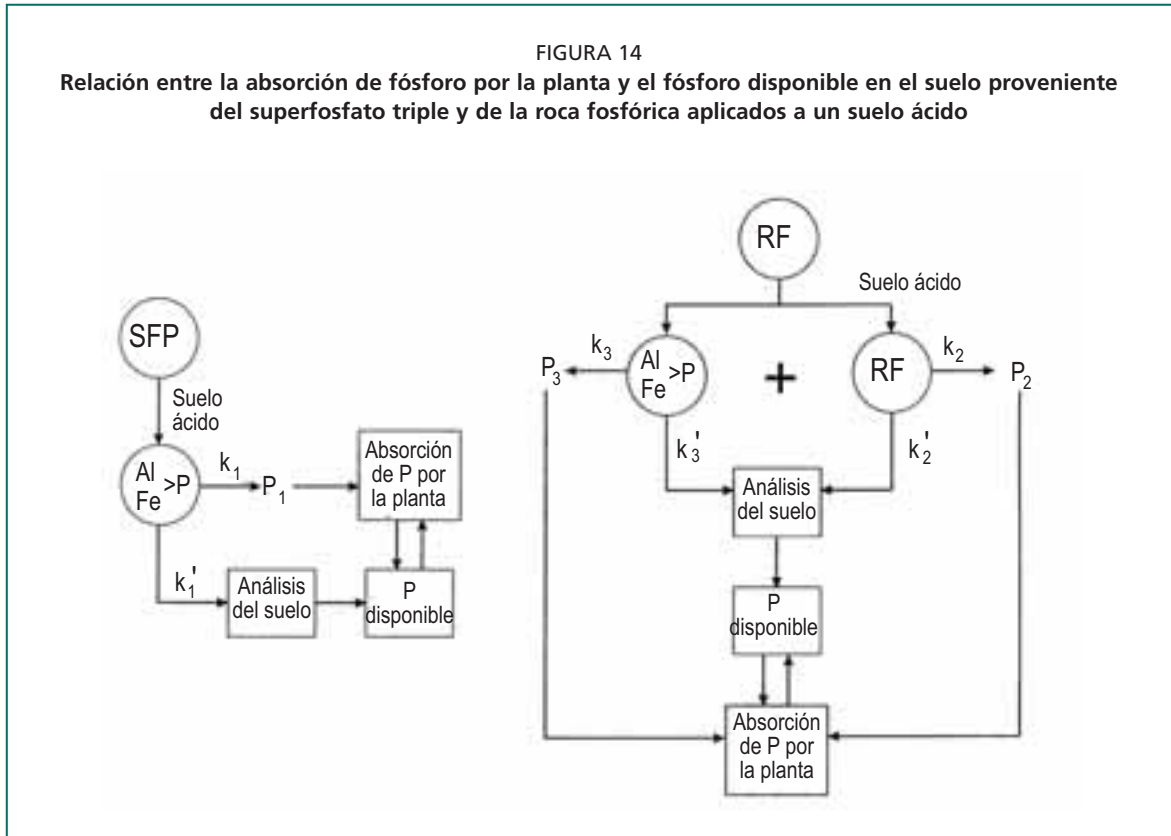
El análisis del fósforo del suelo ha sido tema de múltiples investigaciones. Han sido desarrolladas numerosas soluciones extractivas, variando desde ácidos fuertes hasta productos alcalinos y diversos compuestos quelantes orgánicos e inorgánicos a fin de evaluar el P bio-disponible bajo ciertas condiciones de cultivos y de suelos. Los métodos más ampliamente utilizados para evaluar el P del suelo son: Bray I (Bray y Kurtz, 1945), Mehlich I (Nelson *et al.*, 1953) y Olsen (Olsen *et al.*, 1954). Otros métodos corrientes son Bray II, Mehlich II y III y la resina (Fixen y Grove, 1990). Sin embargo, todos estos métodos son empleados principalmente para proporcionar recomendaciones con los fertilizantes fosfatados solubles en agua tales como el fosfato diamónico, el superfosfato simple y el superfosfato triple. Varios estudios han mostrado que estos métodos de análisis convencionales, ácidos o alcalinos, no ofrecen resultados confiables en los suelos fertilizados con la roca fosfórica (Perrott *et al.*, 1993; Menon y Chien, 1995; Rajan *et al.*, 1996). Existe la necesidad de desarrollar métodos de análisis de suelos adecuados que reflejen de mejor manera la absorción del fósforo de la roca fosfórica para un amplio rango de fuentes de roca, de propiedades de suelo y de tipos de cultivo. Además, los métodos de análisis de suelo deben ser adecuados para ambos, tanto para la roca fosfórica como para los fertilizantes fosfatados solubles en agua. Este tema ha llegado a ser más importante debido al interés creciente en el uso de las rocas fosfóricas para aplicación directa en los países desarrollados y en vías de desarrollo, por ejemplo en Australia, Brasil, Indonesia, Malasia, Nueva Zelandia y en los países del África subsahariana.

Este capítulo proporciona una revisión de los métodos de análisis de suelos que han sido empleados para medir el P disponible en los suelos tratados con la roca fosfórica y los fertilizantes fosfatados solubles en agua. Comienza con una introducción sobre la naturaleza de las reacciones de la roca fosfórica y de los fertilizantes solubles en agua en los suelos. Luego examina el empleo del método de la cinética de intercambio isotópico utilizando el  $^{32}\text{P}$  en relación a las mediciones del P disponible en el suelo.

### LA REACCIÓN DEL FÓSFORO EN EL SUELO Y LOS MÉTODOS DE ANÁLISIS

Cuando un fertilizante fosfatado soluble en agua, por ejemplo el superfosfato triple es aplicado a un suelo ácido que contiene óxidos de hierro y aluminio, los productos de la reacción bajo la forma de P-Fe-Al son las fuentes de P disponible para la absorción por la planta a través de los procesos de desorción/disolución (Figura 14). Si la cantidad de P disponible extraída por un método de análisis ( $k_1'$ ) es proporcional (es decir tiene una buena correlación) a la cantidad de P absorbida por la planta ( $k_1$ ) o el rendimiento del cultivo, entonces el método de análisis es adecuado para proveer recomendaciones de las dosis de fertilizantes fosfatados solubles en agua.

Cuando una roca fosfórica es aplicada a un suelo ácido (Figura 14), su disolución libera P en la solución del suelo. Las raíces de la planta pueden absorber directamente una parte del P liberado y otra parte del P liberado forma los productos de la reacción. Estos también pueden aportar P disponible más tarde a través del proceso de desorción. A diferencia de los fertilizantes fosfatados solubles en agua, la concentración de P en la solución suelo a partir de la disolución de la roca fosfórica es demasiado baja para precipitar los compuestos de P-Fe-Al. Entonces, ambos, los productos de la reacción



y la roca fosfórica no disuelta pueden proporcionar P disponible a la planta (Chien, 1978). El grado de disponibilidad relativa de la roca fosfórica no disuelta en relación al P-Fe-Al depende de la reactividad de la roca fosfórica, de la capacidad de retención (fijación) de P del suelo y de la duración de la reacción de la roca fosfórica con el suelo. Si bien se puede asumir que los productos de la reacción de la disolución de la roca fosfórica son los mismos que los de la disolución del superfosfato triple, es decir  $k_3/k_3' = k_1/k_1'$ , el mineral fosfatado en la roca fosfórica es el P-Ca (fosfato de calcio). Esto es diferente de los productos de la reacción del superfosfato triple, que están en la forma de P-Fe-Al. La proporcionalidad de  $k_1/k_1'$  para el superfosfato triple puede o no ser la misma que la de  $k_2/k_2'$  para la roca fosfórica con un método de análisis de suelo dado. Si  $k_2/k_2' > k_1/k_1'$ , el método de análisis subestimaré el P disponible de la roca fosfórica con respecto al superfosfato triple. Si  $k_2/k_2' < k_1/k_1'$ , el método de análisis sobreestimaré el P disponible de la roca fosfórica con respecto al superfosfato triple. Si  $k_2/k_2' = k_1/k_1'$ , entonces el método de análisis será aplicable para ambos, la roca fosfórica y el superfosfato triple.

Tal como se indica en la Figura 14, mientras que la roca fosfórica no disuelta es la fuente primaria para proporcionar el P disponible para la planta, habrá dos curvas separadas de calibración con un método de suelo dado (una para la roca fosfórica y otra para el superfosfato triple) si  $k_2/k_2' \neq k_1/k_1'$ . Cuando la mayoría de la roca fosfórica se ha disuelto y los productos de la reacción de la roca fosfórica son las fuentes principales del P disponible para la planta, ambos, la roca fosfórica y el superfosfato triple seguirán la misma curva de calibración si  $k_3/k_3' = k_1/k_1'$ , con un método de suelo dado. Sin embargo, hay cierta evidencia para sugerir que los productos de la reacción de la roca fosfórica con el suelo y su disponibilidad para las plantas pueden ser diferentes de aquellos obtenidos con los fertilizantes fosfatados solubles, es decir  $k_3/k_3' \neq k_1/k_1'$  debido al carácter de liberación lenta de la disolución de la roca fosfórica (Chien *et al.*, 1987a). Por lo tanto, un método de análisis de suelo puede ser aplicable a ambos, la

roca fosfórica y el superfosfato triple dependiendo de la naturaleza química del método (ácido, alcalino, etc.), de la cantidad de roca fosfórica no disuelta y de la cantidad y naturaleza de los productos de la reacción formados durante la disolución de la roca fosfórica.

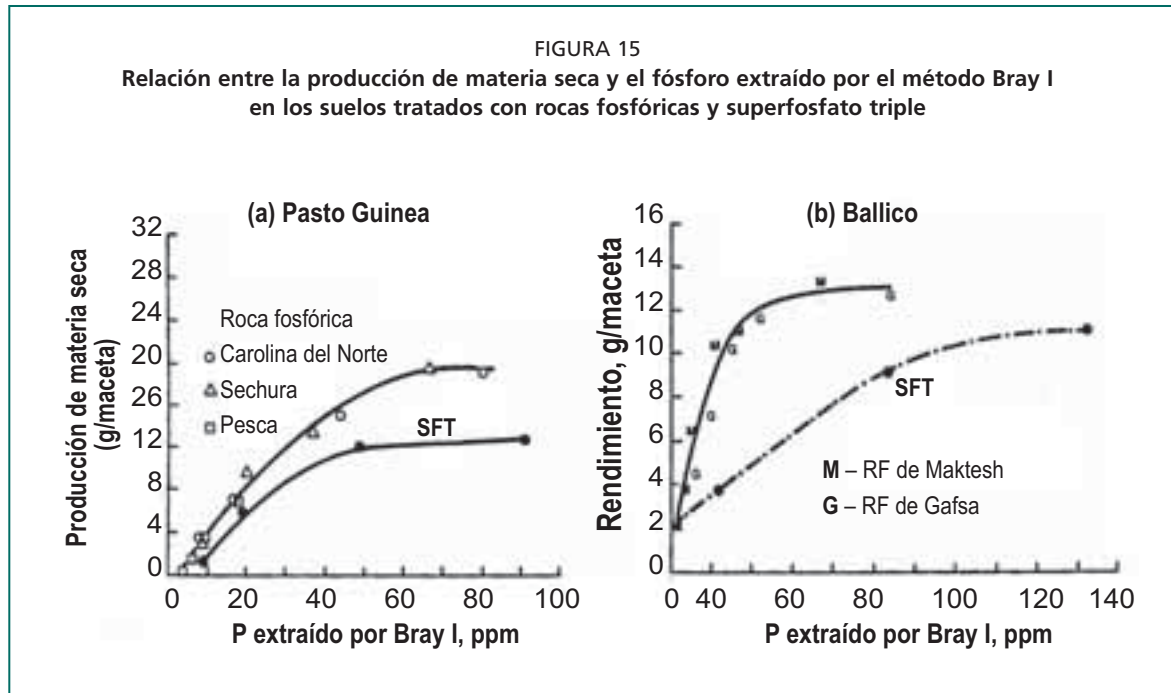
## MÉTODOS DE ANÁLISIS DE SUELO CONVENCIONALES

### El método Bray I

La solución Bray I ( $\text{NH}_4\text{F}$  0,03 M +  $\text{HCl}$  0,025 M) desarrollada por Bray y Kurtz (1945) ha sido empleada ampliamente para determinar el P disponible en los suelos. El método ha dado resultados que están altamente correlacionados con la respuesta de los cultivos a la fertilización fosfatada. La combinación de dos elementos extractivos débiles como el  $\text{HCl}$  y el  $\text{NH}_4\text{F}$  tiene el propósito de extraer las formas solubles de P con el ácido y precipitar el  $\text{CaF}_2$ , mayormente los P-Ca además de la apatita y una porción de los P-Fe-Al mediante el secuestro de los cationes por los iones del fluor. Por ello, muchos investigadores han asumido que el P extraído por Bray I de los suelos tratados con la roca fosfórica es el P disponible derivado de los productos de la reacción de la roca fosfórica mas bien que de las rocas fosfóricas no disueltas en los suelos. Sin embargo, Chien (1978) encontró que Bray I fue capaz de disolver las rocas fosfóricas en un suelo ácido al tiempo cero, es decir antes de que el suelo reaccionara con las rocas fosfóricas. Las cantidades de P-Bray I extraídas del suelo tratado con las rocas fosfóricas antes y después de la incubación (tres semanas) se correlacionaron positivamente con la solubilidad de la roca fosfórica y la dosis de P. De esta manera, Bray I puede predecir la respuesta de los cultivos a varias fuentes de roca fosfórica aplicadas a dosis diferentes sin comparación con los fertilizantes fosfatados solubles en agua. Numerosos trabajos apoyan esta afirmación (Barnes y Kamprath, 1975; Smith *et al.*, 1957; Smith y Grava, 1958; Howeler y Woodruff, 1968; Hammond, 1977; Mostara y Datta, 1971). Sin embargo, se presenta la pregunta si el método Bray I puede ser utilizado para comparar las respuestas de los cultivos al P disponible en un suelo tratado con la roca fosfórica y los fertilizantes fosfatados solubles en agua.

Barnes y Kamprath (1975) informaron sobre dos curvas diferentes de rendimiento de materia seca de maíz que fueron graficadas en función del nivel de P-Bray I obtenido para dos rocas fosfóricas y el superfosfato triple. Estas curvas indicaron que el rendimiento de materia seca del maíz fue más alto en el suelo tratado con una roca fosfórica que en el suelo tratado con superfosfato triple y este efecto se obtuvo para el mismo nivel de P-Bray I. Además, hubo una alta correlación entre el P extraído-Bray I de estos suelos tratados con las rocas fosfóricas (Florida y Carolina del Norte, Estados Unidos de América) y el rendimiento de la planta y la absorción de P independientemente de los tipos de suelo, del pH del suelo y de la fuente de roca fosfórica. Sin embargo, Barnes y Kamprath trataron de explicar la razón de las dos curvas diferentes con las rocas fosfóricas y el superfosfato triple cuando graficaron el rendimiento de materia seca de maíz versus el P extraído-Bray I. Una posible explicación es que existen ciertos «productos de acidulación» de la roca fosfórica que la planta puede utilizar pero que la solución de extracción no puede disolver.

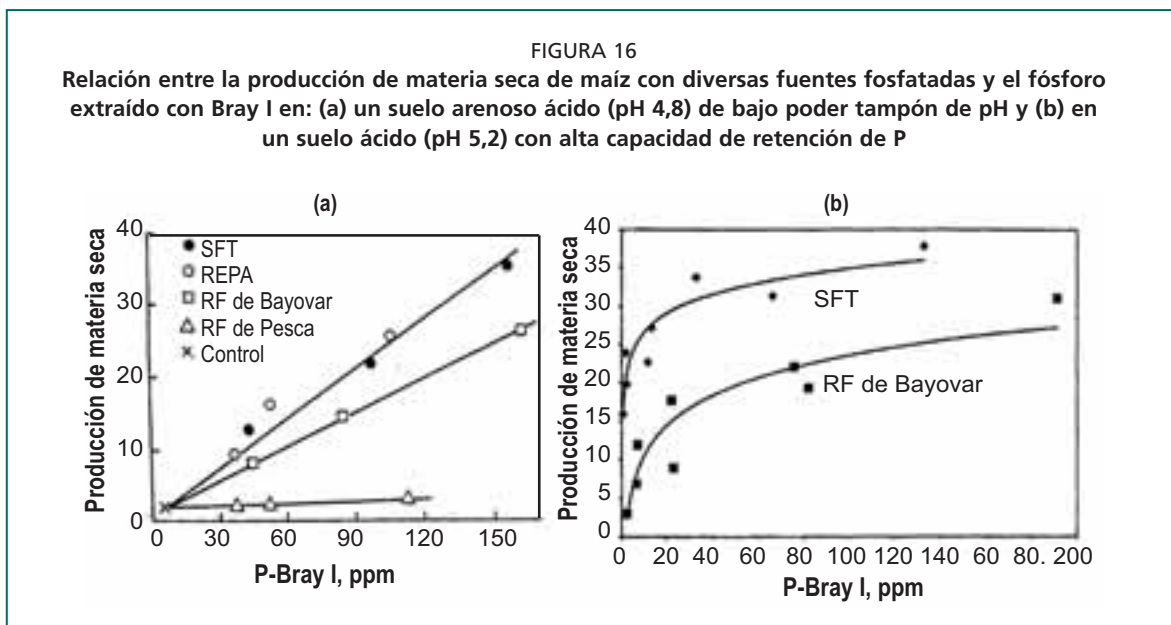
La Figura 15 presenta dos ejemplos del uso de Bray I para evaluar el P disponible de las rocas fosfóricas en comparación al superfosfato triple. Estos resultados muestran que la relación entre el rendimiento de materia seca y el P-Bray I fue idéntica para las diversas fuentes de roca fosfórica, es decir una curva única se adaptó para todas las fuentes de roca fosfórica. Además, los resultados muestran que la curva Bray I de las rocas fosfóricas estaba por encima de la curva del superfosfato triple. Esto sugiere que el método Bray I subestimó el P disponible de las rocas fosfóricas con respecto al superfosfato triple debido a que se obtuvo un rendimiento de materia seca más alto con las rocas fosfóricas que con el superfosfato triple para un mismo nivel de P extraíble-Bray I. Aparentemente las soluciones ácidas débiles de Bray I extrajeron menos P



Fuentes: Datos de (a) Hammond (1977) y (b) Reinhorn y Hagin (1978, datos no publicados).

de la apatita en la roca fosfórica no disuelta que de los productos de la reacción del superfosfato triple en comparación con la absorción relativa por las plantas del P de la roca fosfórica y del superfosfato triple, esto es  $k_2/k_2' > k_1/k_1'$  (Figura 14).

Tal como lo muestra la Figura 16, Bray I también puede sobreestimar el P disponible de la roca fosfórica con respecto al superfosfato triple en un suelo ácido arenoso o en un suelo de alta capacidad de retención (fijación) de P. En los suelos arenosos con relativamente baja capacidad tampón (*buffer*) de pH, el pH de la suspensión del suelo puede ser todavía ácido durante la extracción. Por ejemplo, el pH del extracto Bray I de un suelo arenoso ácido (pH 4,8) mostrado en la Figura 16 (a) fue de 3,1, poco diferente



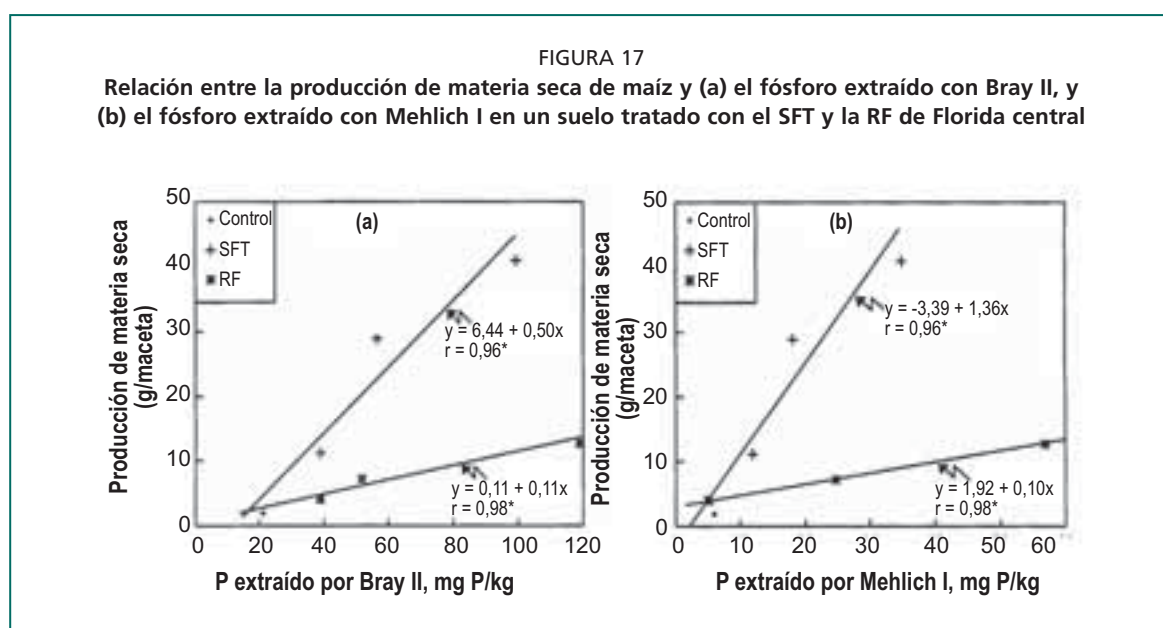
Fuentes: Datos de (a) Chien et al. (1987b) y (b) Hammond et al. (1986a).

del pH de la solución Bray I (pH 3,0). Por lo tanto, la solución Bray I puede disolver proporcionalmente más P de la roca fosfórica que de los productos de la reacción del superfosfato triple en comparación con la absorción de las dos fuentes, es decir  $k_2/k_2' < k_1/k_1'$  como se ha mostrado en la Figura 14. En los suelos con relativamente alta capacidad *buffer* de pH, la acidez de la solución Bray I puede ser neutralizada parcialmente por el suelo de tal manera que no es demasiado fuerte para extraer el P en exceso de la roca fosfórica. Por ejemplo, el pH del extracto Bray I de un suelo ácido (pH 5,2) conteniendo 34 por ciento de arcilla fue 4,6, más alto que el pH de la solución Bray I (pH 3,0). Para estos tipos de suelos, Bray I a menudo subestima el P disponible de la roca fosfórica con respecto al superfosfato triple como representado en la Figura 15.

En los suelos de relativamente alta capacidad de fijación de P, el P disponible para la planta de la disolución de la roca fosfórica en la solución suelo ( $k_2$  en la Figura 14) puede ser relativamente bajo debido a que el P liberado de la roca fosfórica es fijado por el suelo. Sin embargo, la solución Bray I puede todavía extraer P de la roca fosfórica durante la extracción ( $k_2'$  en la Figura 14). Por lo tanto Bray I puede sobreestimar el P disponible de la roca fosfórica con respecto al superfosfato triple en los suelos con alta fijación de P como representado en la Figura 16 (b), es decir  $k_2/k_2' < k_1/k_1'$  como indicado en la Figura 14.

### Los métodos Bray II y Mehlich I

Las soluciones de extracción de los métodos Bray II ( $\text{NH}_4\text{F}$  0,03 M +  $\text{HCl}$  0,1 M) y Mehlich I ( $\text{HCl}$  0,05 M +  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,0125 M) son más ácidas que la de Bray I debido a las concentraciones relativamente más altas del  $\text{HCl}$ . Estos dos métodos son comúnmente utilizados en los suelos ácidos tropicales, por ejemplo Bray II en Malasia y Colombia y Mehlich I en Brasil. Debido a los reactivos fuertemente ácidos empleados por estos métodos, pueden solubilizar una cantidad importante de la roca fosfórica no disuelta durante la extracción del P del suelo. Por consiguiente pueden sobreestimar la disponibilidad de la roca fosfórica con respecto al fertilizante P soluble en agua (Barnes y Kamprath, 1975; Yost *et al.*, 1982; Bationo *et al.*, 1991). La Figura 17 muestra que ambos, Bray II and Mehlich I, extrajeron proporcionalmente más P de la roca fosfórica que de los productos de la reacción del superfosfato triple con respecto a la disponibilidad de P, es decir  $k_2/k_2' < k_1/k_1'$  como indicado en la Figura 14. Por lo



Fuente: Datos de Menon *et al.* (1989b).



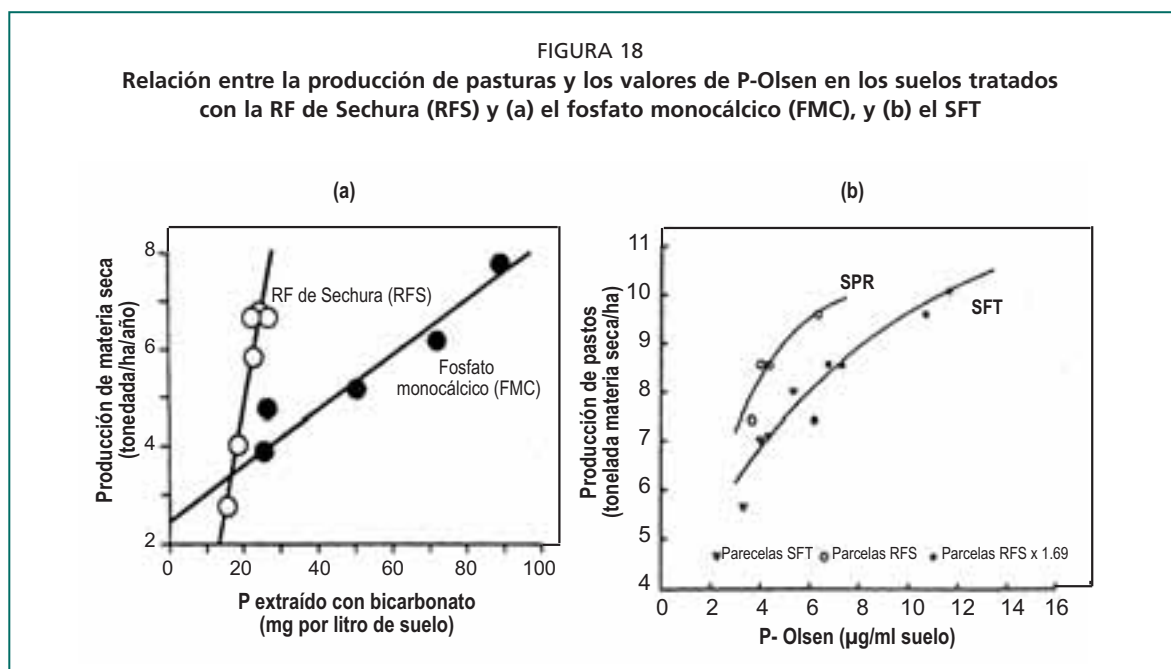
tanto, los métodos Bray II y Mehlich I no son recomendados para la roca fosfórica y el fertilizante P soluble en agua debido a que pueden sobreestimar el P disponible de la roca fosfórica en comparación al fertilizante P soluble en agua.

### El método Olsen

El método Olsen ( $\text{NaHCO}_3$  0,5 M, pH 8,5) emplea un reactivo alcalino que extrae el P de los productos de la reacción de la roca fosfórica (es decir  $k_3'$ ) en el suelo tratado con la roca fosfórica de manera semejante a los productos de la reacción del superfosfato triple (es decir  $k_1'$ ) (Figura 14).

Si bien  $k_3/k_3'$  de la roca fosfórica puede ser semejante a  $k_1/k_1'$  del superfosfato triple, el reactivo Olsen no extrae el P de la roca fosfórica no disuelta (esto es  $k_2' = 0$ ). Sin embargo, la roca fosfórica no disuelta puede ser una fuente de P más importante que sus productos de la reacción para proveer P disponible para la planta, especialmente el efecto inicial del P. En este caso, el método Olsen normalmente subestima el P disponible de la roca fosfórica en comparación con aquel del superfosfato triple cuando se considera el P absorbido por la planta, es decir  $k_2/k_2' > k_1/k_1'$  (Figura 14). Por lo tanto, el método Olsen frecuentemente tiene como resultado la presencia de dos curvas, con la curva de la roca fosfórica por encima de la curva del fertilizante P soluble en agua cuando el rendimiento del cultivo o el P absorbido es graficado en función del P extraído-Olsen (Figura 18).

En los resultados del estudio de Rajan *et al.* (1991b) presentados en la Figura 18 (a) la pendiente de la curva de calibración para la roca fosfórica fue muy empinada debido al estrecho rango de los valores de P-Olsen, que representaban solamente el P disponible de los productos de reacción de la roca fosfórica pero no el P de la roca fosfórica no disuelta. Para tener la misma curva de calibración para ambos, la roca fosfórica y el superfosfato triple, Perrott *et al.* (1993) utilizaron un factor de corrección (1,69) para multiplicar los valores de P-Olsen de la roca fosfórica y así desplazar la curva de la roca fosfórica hacia la curva del superfosfato como se aprecia en la Figura 18(b). Sin embargo esta modificación es un método empírico y depende de varios factores, por ejemplo el tiempo de disolución y la reactividad de la roca fosfórica, las propiedades del suelo y la especie cultivada.



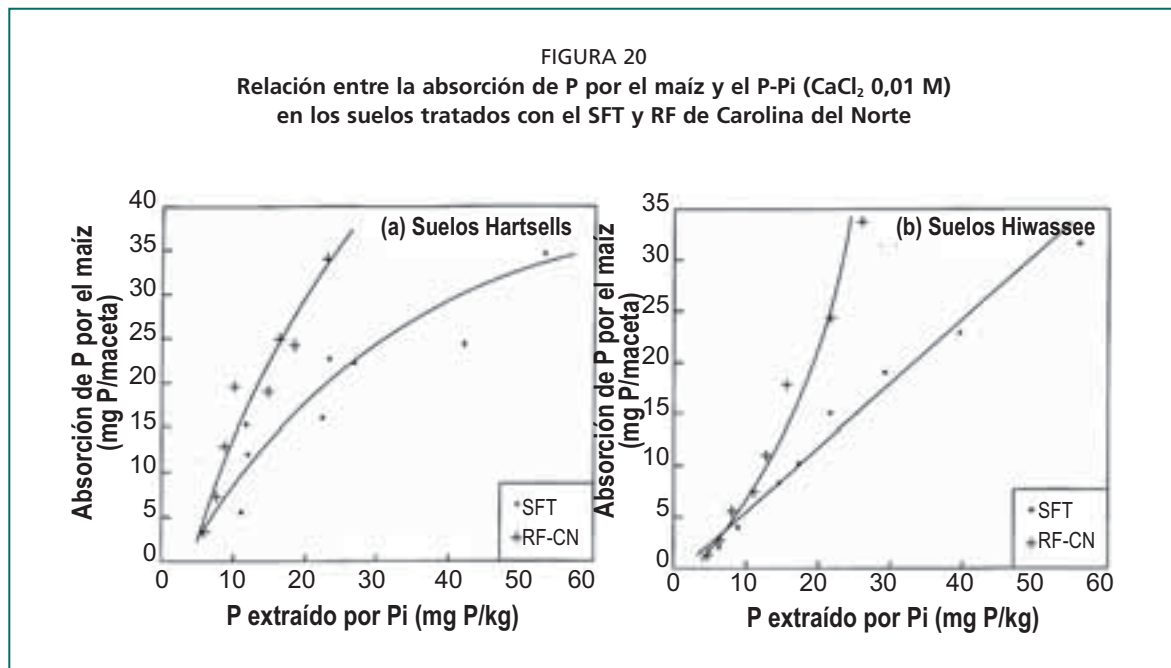
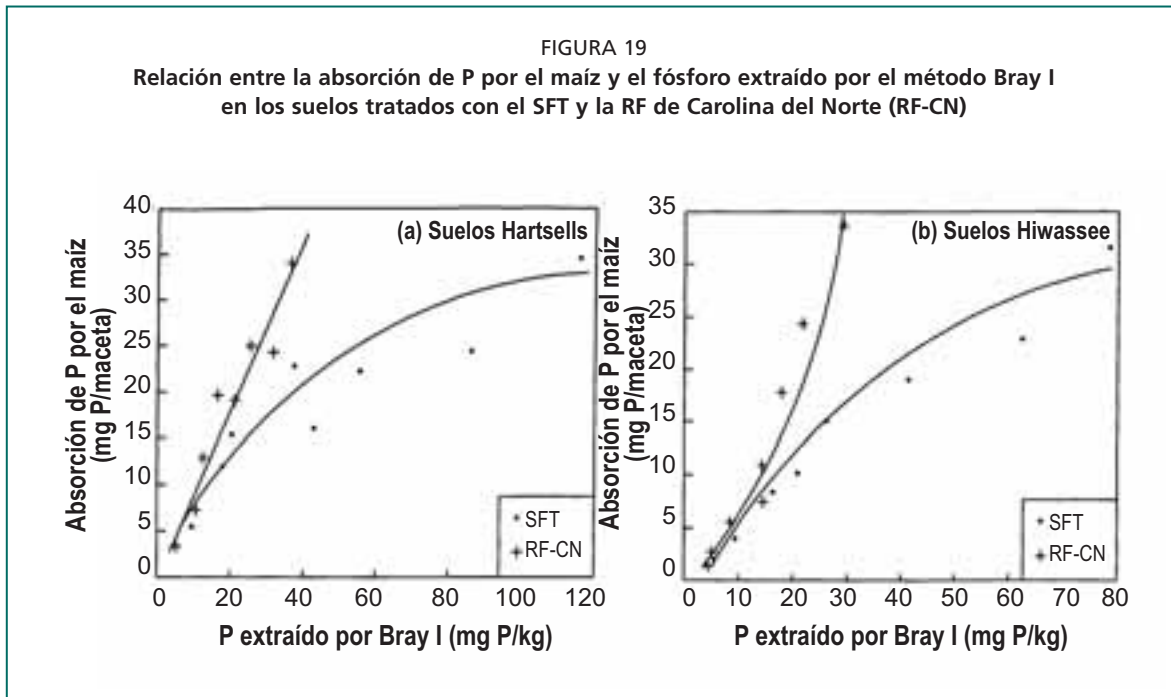
## MÉTODOS DE ANÁLISIS DE SUELO RECIENTEMENTE DESARROLLADOS

### Método de las cintas de papel impregnadas en óxido de hierro

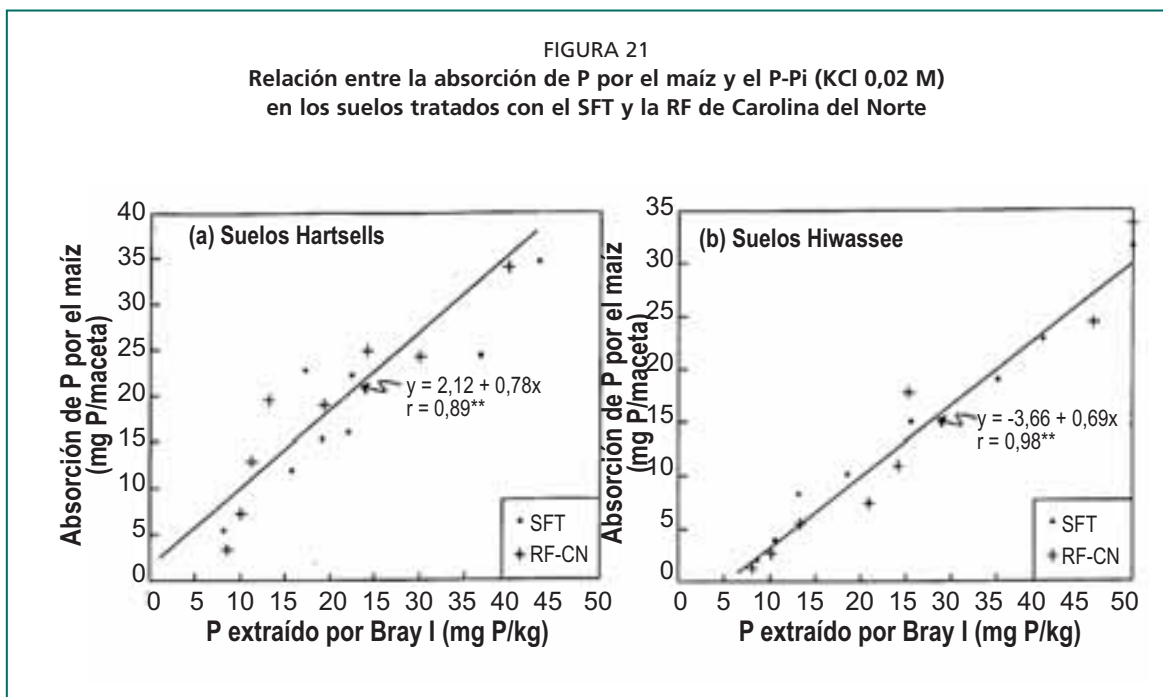
El método de las cintas de papel impregnado en óxido de hierro ( $P_i$ ) es una nueva técnica para evaluar el P disponible en los suelos (Menon *et al.*, 1989b; Menon *et al.*, 1990; Chardon *et al.*, 1996; Menon *et al.*, 1997). En lugar de las soluciones de extracción el método emplea cintas  $P_i$  como un sumidero para adsorber y retener el P presente en una suspensión de suelo, de manera similar a una resina de intercambio aniónico. Sin embargo, a diferencia de la resina de intercambio aniónico, las cintas  $P_i$  muestran una preferencia por el fosfato sobre otros aniones que se hallan comúnmente en el suelo (Van der Zee *et al.*, 1987). Además, los iones fosfato pueden ser recuperados fácilmente de la suspensión de suelo. La preparación de las cintas  $P_i$  es relativamente simple y de bajo costo permitiendo que casi todos los laboratorios puedan producirlas en lugar de comprar la costosa resina de intercambio aniónico (Menon *et al.*, 1989a). A diferencia de los reactivos utilizados en los métodos convencionales de análisis de suelo, las cintas  $P_i$  no reaccionan con el suelo sino que solamente adsorben el P que entra en la solución del suelo. Este método puede ser utilizado en los suelos fertilizados con la roca fosfórica y los fertilizantes fosfatados solubles en agua.

Menon *et al.* (1989b) informaron sobre el uso de las cintas  $P_i$  para evaluar el P disponible en los suelos tratados con la roca fosfórica de Florida de reactividad media o el superfosfato antes de un cultivo de maíz. En comparación con otros métodos convencionales, el método  $P_i$  tuvo la más alta correlación entre el rendimiento de materia seca o el P absorbido y el P disponible del suelo cuando todos los suelos, las fuentes de P y las dosis de P fueron combinados. Sin embargo, en este estudio los rangos de los resultados de rendimiento de materia seca o del P absorbido y el P- $P_i$  obtenidos con el superfosfato triple fueron mucho más amplios que aquellos obtenidos con la roca fosfórica de Florida. Estadísticamente, no era correcto utilizar la misma línea de regresión entre la respuesta del cultivo (rendimiento de materia seca o P absorbido) y el P- $P_i$  para ambos -la roca fosfórica y el superfosfato triple- ya que la línea de regresión estuvo dominada por el superfosfato triple (no obstante que el coeficiente de correlación fue altamente significativo). A fin de evaluar críticamente si la roca fosfórica y el superfosfato triple siguen la misma relación cuando la respuesta del cultivo es graficada *versus* el P- $P_i$  en el suelo, las escalas de las respuestas del cultivo y del P- $P_i$  obtenidas con la roca fosfórica y el superfosfato triple deberían ser aproximadamente idénticas. Además, el método  $P_i$  inicialmente desarrollado con  $\text{CaCl}_2$  0,01 M para la extracción de suelo podría haber subestimado el P disponible de la roca fosfórica con respecto al superfosfato triple en el estudio de Menon *et al.* (1989b) debido al efecto de ion común del Ca sobre la disolución de la roca fosfórica, esto es  $k_2/k_2' > k_1/k_1'$  (Figura 14).

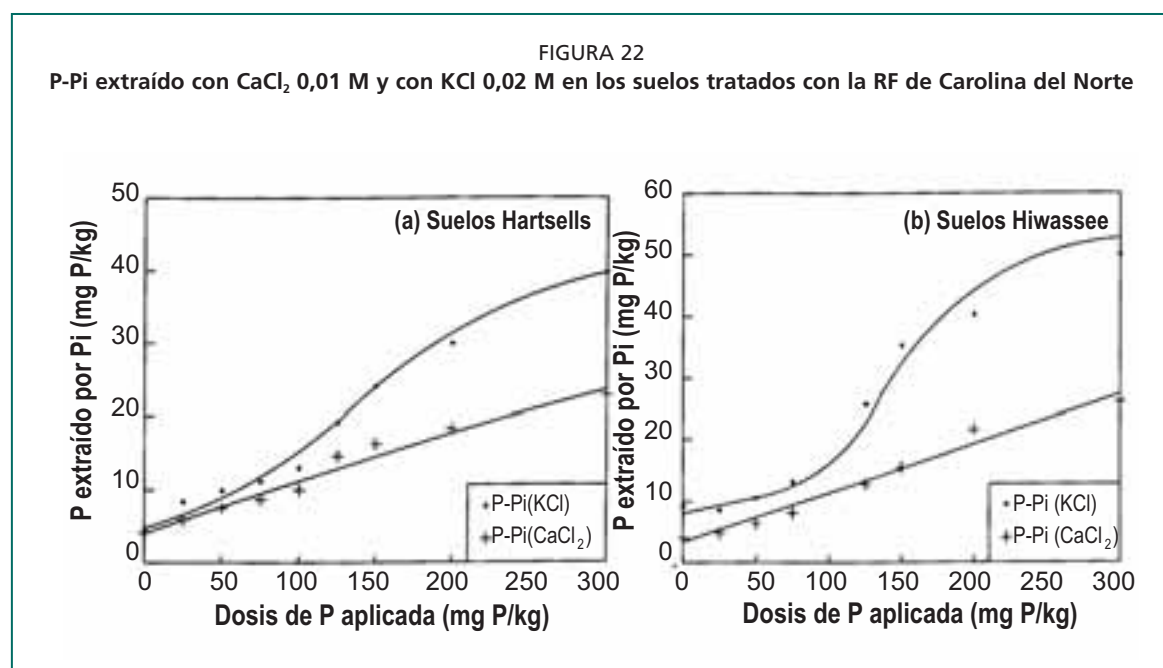
Habib *et al.* (1998) preincubaron dos suelos ácidos con la roca fosfórica de Carolina del Norte altamente reactiva y el superfosfato triple y luego hicieron extracciones del suelo para medir el P disponible antes de un cultivo de maíz. Las respuestas del cultivo (rendimiento de materia seca o P absorbido) obtenidas con la roca fosfórica de Carolina del Norte estuvieron entre el 83 y 91 por ciento de aquellas del superfosfato triple. Los métodos de análisis utilizados fueron las cintas  $P_i$  con  $\text{CaCl}_2$  0,01 M, las cintas  $P_i$  con KCl 0,02 M y Bray I. Los resultados mostraron que ambos, Bray I y las cintas  $P_i$  con  $\text{CaCl}_2$  0,01 M subestimaron el P disponible de la roca fosfórica de Carolina del Norte (Figuras 19 y 20), confirmando que  $k_2/k_2' > k_1/k_1'$  (Figura 14). El P disponible estimado con las cintas  $P_i$  con KCl 0,02 M en lugar de  $\text{CaCl}_2$  0,01 M estuvo más estrechamente correlacionado con la respuesta del cultivo para los suelos tratados con la roca fosfórica de Carolina del Norte y el superfosfato triple (Figura 21), esto es  $k_2/k_2' = k_1/k_1'$  (Figura 14). Una menor cantidad de P fue extraída de la roca fosfórica de Carolina del Norte con las cintas  $P_i$  con  $\text{CaCl}_2$  0,01 M que con KCl 0,02 M (Figura 22) debido a que el  $\text{CaCl}_2$  redujo la disolución de la



roca fosfórica mientras que ningún efecto fue observado con el superfosfato triple (Figura 23) debido a que no hay efecto del ion común Ca sobre la extracción de sus productos de la reacción (P-Fe-Al). Por lo tanto, se recomienda utilizar el método P<sub>i</sub> con KCl 0,02 M para estimar el P disponible en los suelos tratados con ambos la roca fosfórica y los fertilizantes fosfatados solubles en agua. Sin embargo, se necesitan investigaciones adicionales, especialmente ensayos agronómicos bajo condiciones de campo para validar este método P<sub>i</sub> modificado.



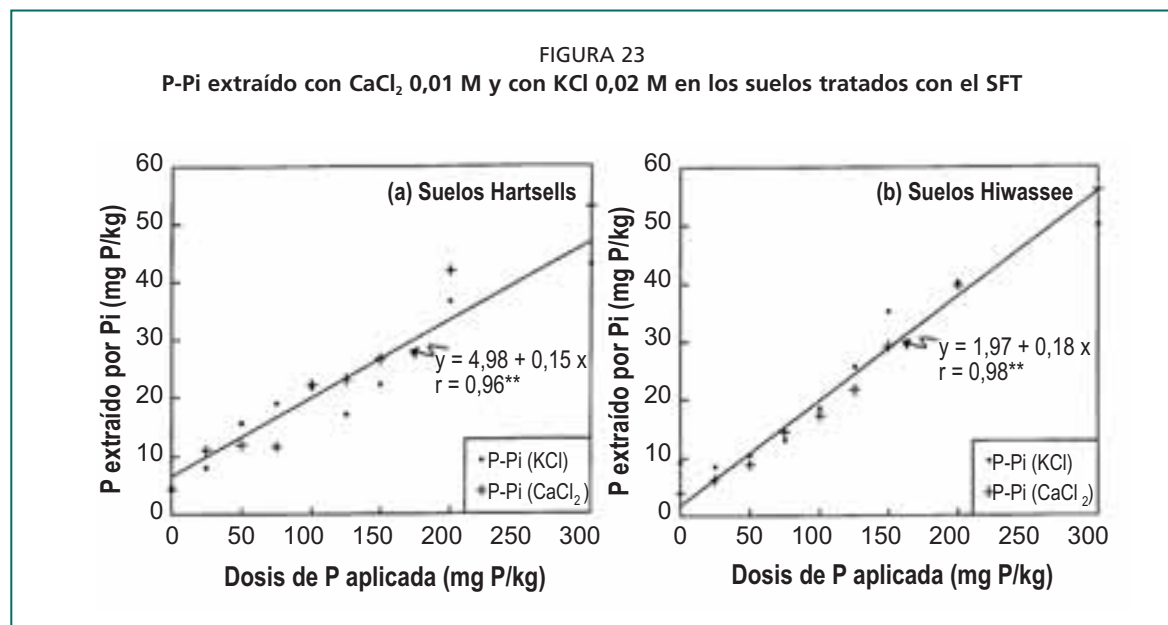
Fuente: Habib *et al.*, 1998.



Fuente: Habib *et al.*, 1998.

### Método de mezcla de resinas de intercambio aniónico y catiónico

Desde su introducción por Amer *et al.* (1955), la resina de intercambio aniónico ha sido ampliamente utilizada en los trabajos de investigación para evaluar el P disponible del suelo. Como el método  $P_i$ , la resina aniónica es un método no destructivo que simula la actividad de las raíces de las plantas. Sin embargo, es un procedimiento que insume cierto tiempo, incluyendo un proceso de intercambio aniónico en dos etapas (intercambio de resina aniónica con el P del suelo seguido por intercambio de P en la



Fuente: Habib *et al.*, 1998.

resina con un anión). Además, la dificultad de separar los pequeños granos de resina del suelo y su costo han limitado el uso de este método a algunos países, por ejemplo Brasil y Dinamarca.

Saggar *et al.* (1990) introdujeron un método simplificado con una banda de membrana con resinas conteniendo una mezcla de cationes ( $\text{Na}^+$ ) y aniones ( $\text{HCO}_3^-$ ) para evaluar el P disponible en los suelos tratados con la roca fosfórica y los fertilizantes fosfatados solubles en agua. La inclusión de la resina saturada de  $\text{Na}^+$  favorece la liberación de P de la roca fosfórica por extracción del  $\text{Ca}^{+2}$  asociado con la roca fosfórica de tal manera que no subestima la disponibilidad de la roca fosfórica pero no solubilizará en exceso la roca fosfórica para evitar sobreestimar la disponibilidad de la roca, es decir  $k_2/k_2' = k_1/k_1'$  (Figura 14). Saggar *et al.* (1990) simplificaron el procedimiento agitando directamente el P retenido en la banda con un producto reactivo para desarrollar color para el fósforo y así omitieron la etapa de remoción (intercambio tradicional del P retenido por la resina con la solución de  $\text{NaCl}$ ). Las cantidades de P extraído por el procedimiento de la mezcla de resinas estuvieron en proporción a la cantidad y solubilidad de la fuente de P aplicada a los suelos. Posteriormente Saggar *et al.* (1992a, 1992b) compararon el método de la mezcla de resinas catiónica-aniónica con otros siete métodos de análisis de suelo y encontraron que el método de la mezcla de resinas fue el mejor para determinar el P disponible de los suelos tratados con dos rocas fosfóricas de reactividad diferente. El método fue también capaz de describir la relación entre el rendimiento del cultivo y el P disponible para ambos la roca fosfórica y el superfosfato triple, mientras que el método Olsen no funcionó. Sin embargo, se necesitan más estudios para evaluar el método de las bandas de resina mixta catiónica-aniónica para varios cultivos crecidos en diferentes suelos tratados con la roca fosfórica y los fertilizantes fosfatados solubles en agua, especialmente bajo condiciones de campo.

En comparación con el método de la cinta  $\text{P}_i$ , el método de la banda de membrana con resina mixta catiónica-aniónica tiene la ventaja que la banda puede ser regenerada para reuso. Sin embargo, se encuentran solamente disponibles en las compañías químicas comerciales y son probablemente mucho más costosas que las cintas  $\text{P}_i$ .

### Método cinético de intercambio del isótopo $^{32}\text{P}$

La técnica isotópica con  $^{32}\text{P}$  proporciona datos cuantitativos sobre el comportamiento del P en el suelo (Fardeau, 1996) y en el sistema suelo-planta para evaluar la efectividad

de los fertilizantes fosfatados (por ejemplo, las rocas fosfóricas) en función de las prácticas de manejo (Zapata y Axmann, 1995). El método cinético de intercambio isotópico basado en el uso del  $^{32}\text{P}$  (CIP) provee una caracterización completa del P disponible del suelo mediante la determinación de cuatro factores independientes en un solo experimento. El factor intensidad es cuantificado por la medición del potencial químico de los iones P en la solución suelo ( $C_p$ ). El factor cantidad es estimado por la cantidad de iones P que son instantáneamente intercambiables isotópicamente en un minuto ( $E_1$ ). Dos factores de capacidad, uno inmediato y otro diferido, son determinados simultáneamente. Estas cuatro características permiten la aplicación de un modelo funcional y dinámico para caracterizar el P disponible del suelo (Fardeau, 1996).

La mayoría de los métodos de extracción utilizados en los análisis de suelo solo permiten la determinación de un factor cantidad mientras que la extracción con agua mide solamente el factor intensidad. Si bien el método CIP permite la cuantificación de los factores intensidad, cantidad y capacidad, este no puede ser utilizado en los análisis de suelo de rutina debido a la naturaleza radioactiva del isótopo  $^{32}\text{P}$ . Sin embargo, el método CIP puede ser considerado como un método de referencia para evaluar la idoneidad de otros métodos en la determinación de rutina del P disponible del suelo. Aigner *et al.* (2002) compararon el P disponible medido por el método de la cintas  $P_i$  con el método CIP en suelos de propiedades contrastantes y tratados con y sin una roca fosfórica de Marruecos. Para los suelos que no recibieron la roca fosfórica, se encontró una correlación muy alta ( $R^2 = 0,94$ ) entre el P extraído por el método  $P_i$  y el valor  $E_1$  determinado por el método CIP. Para los suelos tratados con la roca fosfórica, la correlación fue más baja ( $R^2 = 0,53$ ). Uno de los suelos con el valor más alto de  $C_p$  (suelo de Hungría) mostró que el valor  $E_1$  disminuyó de 9,4 mg P/kg sin roca fosfórica a 6,8 mg P/kg con la adición de roca fosfórica mientras que el valor P- $P_i$  aumentó de 19,3 a 31,1 mg P/kg. Ninguna explicación definitiva fue dada para esta diferencia. Después de excluir el suelo de Hungría, la correlación entre el método de la cinta  $P_i$  y el método CIP fue muy alta ( $R^2 = 0,92$ ). Por lo tanto, se concluyó que el método de la cinta  $P_i$  es una buena alternativa para el método isotópico en los análisis de rutina proporcionando los mejores estimados de P disponible del suelo que otros métodos de extracción.