

## Capítulo 7

# Sistemas de apoyo a la toma de decisiones para el uso de las rocas fosfóricas

Las rocas fosfóricas pueden ser utilizadas como fertilizantes fosfatados en los sistemas de producción agrícola. Bajo ciertas condiciones, los agricultores pueden aplicarlas a fin de proporcionar fósforo a los cultivos a un costo más bajo que los fertilizantes fosfatados solubles en agua. Sin embargo, antes de aplicar una roca fosfórica, un agricultor probablemente hará preguntas tales como ¿las rocas fosfóricas serán adecuadas para mis tierras? o, ¿un fertilizante fosfatado soluble en agua será más rentable? Los investigadores que han trabajado con las rocas fosfóricas responderán diciendo: «dependerá del tipo de roca fosfórica que utiliza y de las condiciones ambientales que ocurran en sus campos». En realidad muchos factores determinan que una roca fosfórica dada sea un fertilizante fosfatado efectivo en el campo de un agricultor. La forma en que estos factores interaccionan para influenciar el comportamiento de la roca fosfórica es compleja en cualquier condición específica. En esos casos, es difícil hacer recomendaciones técnicas generales.

Los sistemas de apoyo a la toma de decisiones son herramientas simples que permiten que los técnicos de los servicios de investigación y extensión proporcionen a los agricultores recomendaciones técnicas y asistencia en la toma de decisiones. Un sistema de apoyo a la toma de decisiones para el uso de la roca fosfórica (SAD-RF) utiliza información disponible sobre los factores antes indicados para predecir si una roca fosfórica dada será efectiva para un cultivo y un medio ambiente determinados. Este capítulo discute los diferentes tipos de sistemas de apoyo a la toma de decisiones para predecir el comportamiento de la roca fosfórica, incluyendo los procedimientos que se utilizaron para desarrollar un sistema en Nueva Zelanda y en Australia. Se presentan ejemplos que ilustran estos métodos. Al final, se describen brevemente las etapas seguidas por la FAO, el IFDC y la OIEA para desarrollar un sistema de apoyo a una decisión global para su utilización en los países tropicales y subtropicales con un amplio rango de cultivos alimenticios.

### NECESIDAD DE UN SISTEMA DE APOYO A LA TOMA DE DECISIONES PARA LAS ROCAS FOSFÓRICAS

Los agricultores necesitan saber si la utilización de la roca fosfórica: (i) será capaz de proporcionar fósforo a un suelo deficiente en este elemento y, (ii) será económicamente rentable en comparación con el empleo de un fertilizante fosfatado soluble en agua. Los agricultores podrían obtener esta información de un técnico especializado en el uso de la roca fosfórica. Sin embargo, existen limitaciones para lograr obtener información precisa respecto a estas recomendaciones técnicas. Este capítulo muestra que el sistema de apoyo a la toma de decisiones es la forma más eficaz de integrar los principales factores que determinan la efectividad de la roca fosfórica para indicar luego si será eficiente en los campos de los agricultores.

Un sistema de apoyo a la toma de decisiones es un sistema interactivo para ordenadores que ayuda a quienes toman decisiones a utilizar datos y modelos para resolver problemas no estructurados (Sprague y Carlson, 1982). La finalidad principal de tal sistema es mejorar los resultados obtenidos por las personas que toman decisiones

reduciendo el tiempo y los recursos humanos necesarios para analizar situaciones complejas. Un sistema de apoyo a la toma de decisiones será capaz de predecir si una roca fosfórica particular será efectiva para proporcionar fósforo a la planta cultivada en el campo. Algunos de estos sistemas han sido desarrollados para predecir el comportamiento de las rocas fosfóricas en ambientes diferentes.

### BASE CONCEPTUAL PARA CONSTRUIR UN SISTEMA DE APOYO A LA TOMA DE DECISIONES PARA LAS ROCAS FOSFÓRICAS

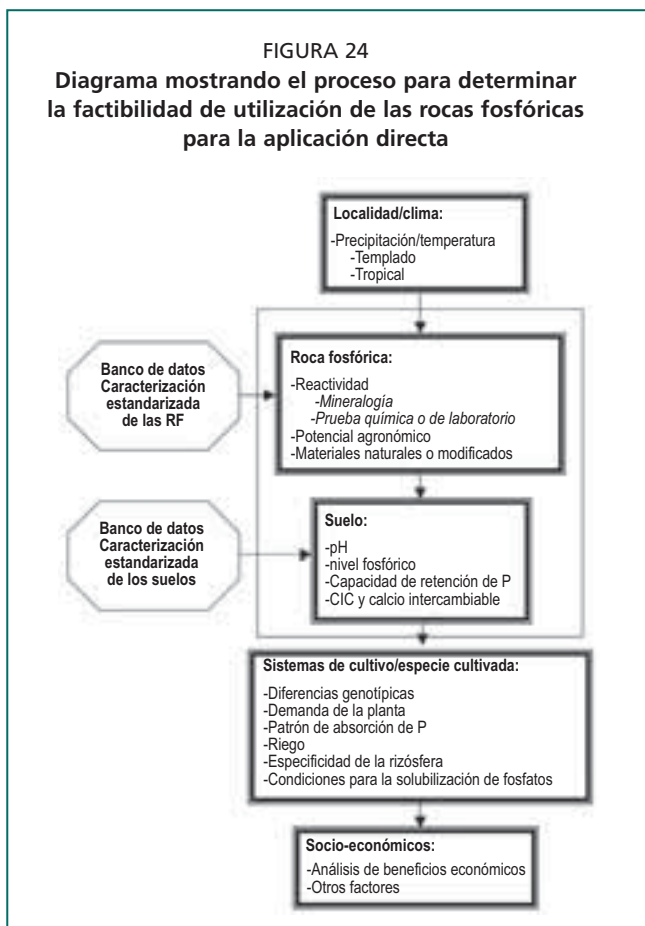
En la práctica, una roca fosfórica será agrónomicamente efectiva para un sistema agrícola si es capaz de disolverse lo suficientemente rápido para proveer fósforo disponible a las plantas a una tasa adecuada para su crecimiento. La pregunta dominante es saber si la tasa de disolución de la roca fosfórica corresponde a la tasa de demanda de fósforo del cultivo. Varios autores han revisado las condiciones necesarias para que esto ocurra en las regiones templadas (Khasawneh y Doll, 1978) y tropicales (Hammond *et al.*, 1986b; Sale y Mokwunye, 1993). El Capítulo 5 discute estos aspectos en mayor detalle.

El marco conceptual propuesto en la Figura 24 resume los factores que determinan la factibilidad de la utilización de la roca fosfórica para la aplicación directa (Heng, 2003). Los cinco factores principales que determinan si la tasa de abastecimiento del P disuelto de la roca fosfórica corresponderá a la tasa de demanda de P por el cultivo son: (i) la reactividad de la roca fosfórica, (ii) las propiedades del suelo, (iii) las condiciones climáticas, (iv) el tipo de cultivo y, (v) el sistema de manejo empleado para el crecimiento del cultivo y la aplicación de la roca fosfórica.

Un aspecto final a tener en cuenta es la integración del efecto tiempo. Una característica común de las rocas fosfóricas es que la respuesta inicial de las plantas a la roca fosfórica puede ser limitada. Sin embargo su comportamiento con respecto

a los fertilizantes fosfatados solubles en agua tiende a mejorar con el tiempo. Esto es debido a la disolución continua de la roca fosfórica comparada con la disminución de la disponibilidad de P de los residuos y los productos de la reacción de los fertilizantes fosfatados solubles en agua. La roca fosfórica puede tener un efecto residual superior en comparación al fertilizante fosfatado soluble en agua. El agricultor observa el aumento de los beneficios de la roca fosfórica a medida que transcurre el tiempo.

El marco conceptual presentado en la Figura 24 destaca la complejidad del sistema en su totalidad. Aparte de los factores que afectan el comportamiento agronómico de la roca fosfórica, muchos otros aspectos tienen influencia sobre la utilización de la roca fosfórica, por ejemplo el tamaño del depósito potencial que va a aprovisionar la roca, los costos de explotación, molienda y distribución, la relación costo/beneficio para todos los participantes en la cadena de distribución; el impacto sobre el medio ambiente, los aspectos sociales y económicos y las políticas del gobierno. En el análisis final



Fuente: Heng, 2003.

estos puntos determinarán si un depósito será puesto en explotación para permitir que los agricultores utilicen la roca fosfórica como fertilizante.

El Capítulo 10 discute los aspectos relacionados con la adopción de la roca fosfórica como fertilizante fosfatado por los agricultores locales. Los instrumentos de sistemas de apoyo a la decisión descritos en este capítulo no incluyen la cuestión de la adopción de la roca fosfórica por los agricultores así como los aspectos socioeconómicos y de política antes mencionados. Estos sistemas enfocan solamente el problema de si la roca fosfórica será eficiente en un sistema agrícola específico.

## **DIFERENTES TIPOS DE SISTEMAS DE APOYO A LA TOMA DE DECISIONES PARA PREDECIR EL COMPORTAMIENTO DE UNA ROCA FOSFÓRICA**

### **Modelos mecanicistas**

El modelo matemático desarrollado por Kirk y Nye (1985a, 1985b, 1986) es quizás el método más completo para predecir la disolución de una roca fosfórica. Este modelo se basa sobre la premisa de que la difusión de los iones disueltos fuera de la partícula de la roca fosfórica es la etapa que limita la tasa de disolución. El modelo es capaz de proveer predicciones bastante precisas de la disolución de la roca fosfórica bajo condiciones controladas (Anderson y Sale, 1993). Sin embargo, no puede determinar si un cultivo particular responderá a la aplicación de la roca fosfórica en el campo.

La mayor limitación en el empleo de los modelos mecanicistas complejos es la necesidad de dar entrada a un gran número de parámetros que son difíciles de determinar. Por ejemplo, el modelo de Kirk y Nye necesita diez parámetros para definir el ambiente del suelo, a saber: la concentración y actividades de los iones P y Ca en la solución suelo, el pH del suelo, la capacidad tampón para el pH, la capacidad tampón para el P, los coeficientes de las isotermas de adsorción de P, la densidad de volumen del suelo, el contenido volumétrico de agua en el suelo y el porcentaje de arcilla. Este método es demasiado complejo para el empleo de un sistema de apoyo a la toma de decisiones a nivel de explotación agrícola.

### **La combinación de modelos determinados mecanicistas y empíricos**

#### *El sistema de Nueva Zelanda*

Investigadores en Nueva Zelanda han desarrollado un sistema de apoyo a la toma de decisiones para utilizar las rocas fosfóricas en las regiones de alta precipitación en praderas permanentes pastoreadas por ganado lanar y vacuno. Este sistema está construido en base a cinco componentes (Perrott, 2003).

El primero es un modelo empírico que predice la capacidad de un sitio pastoral particular para el uso de la roca fosfórica considerando el promedio de un coeficiente de difusión (Dm) del fosfato en el suelo del sitio específico. Este coeficiente está basado en las mediciones directas de la disolución de una roca fosfórica estándar (roca fosfórica F de Sechura, 0,075–0,150 mm) en 90 sitios pastorales de Nueva Zelanda durante un período de dos años, los que proporcionaron los datos de la regresión para predecir la variable Dm. El tipo de suelo, el pH, el magnesio (Mg) intercambiable, el drenaje del suelo y la precipitación son usados como parámetros para predecir esta variable.

El segundo componente es una prueba de laboratorio que determina la reactividad de la roca fosfórica midiendo la concentración en equilibrio del P creada por la roca fosfórica (CR) en una solución suelo simulada manteniendo un pH constante (5,5) con un titulador automático. El valor CR junto con la densidad de partículas, la concentración de P y el rango y la cantidad del tamaño de partículas de la roca fosfórica proporcionan una medida de la «reactividad intrínseca de la roca fosfórica» (Perrott, 2003).

El tercer componente es un modelo de determinación mecánica desarrollado de una versión simplificada del modelo de Kirk y Nye (Watkinson, 1994a). Este calcula la tasa anual de disolución de la roca fosfórica particular en un sitio pastoral específico

utilizando las variables predeterminadas de la roca fosfórica y el sitio. Esta tasa anual de disolución es entonces expresada como una tasa constante para su uso en un modelo exponencial de disolución (cuarto componente) y la liberación anual de P de la roca fosfórica se considera como un parámetro de entrada de P disponible para la planta en el grupo de P móvil del suelo, para el Overseer™, que es un sistema integrado de apoyo a la toma de decisiones para los fertilizantes (quinto componente). El Overseer™ es un instrumento para hacer recomendaciones específicas para un sitio dado sobre el uso de los fertilizantes fosfatados, potásicos y azufrados, en base a criterios económicos y de medio ambiente (Metherell y Perrott, 2003).

El sistema de apoyo a la toma de decisiones de Nueva Zelanda es específico para el uso de las rocas fosfóricas reactivas en los sistemas de praderas pastoreadas en los tipos de suelos de este país. Mientras que el sistema está limitado a esta forma de uso de la tierra en esta parte del mundo, el método en si puede ser recomendado ya que trata de definir y cuantificar los pasos secuenciales en el proceso de la disolución de la roca fosfórica. Determinando los parámetros empíricos en base a simples experimentos de campo, el sistema simplifica las complejas interacciones suelo-sitio-clima que definen la probabilidad de una solubilización rápida de las rocas fosfóricas en un ambiente pastoral particular. Determinando la cantidad de la roca fosfórica disuelta que entra cada año en el grupo de P lábil del suelo, el modelo permite comparar la roca fosfórica con los fertilizantes fosfatados solubles en agua, que también contribuyen al grupo de P lábil del suelo.

El sistema de apoyo a las decisiones de Nueva Zelanda es el producto de muchos años de investigación realizada por químicos, agrónomos y especialistas de informática. La importancia de la industria ganadera en Nueva Zelanda y la necesidad de aportar los insumos de los elementos nutritivos para mantener la productividad de estas actividades han apoyado este esfuerzo de investigación.

#### *El sistema de apoyo a la toma de decisiones desarrollado por el IFDC*

El IFDC también ha desarrollado una versión preliminar de un sistema para estimar la eficiencia agronómica de la roca fosfórica aplicada recientemente con respecto a los fertilizantes fosfatados solubles en agua (Hellums *et al.*, 1992; Chien *et al.*, 1999; Singh *et al.*, 2003). Este desarrollo está basado en el trabajo del IFDC en África occidental. El modelo incorpora los efectos de la fuente de la roca fosfórica (solubilidad de la roca fosfórica), del pH del suelo, de la textura del suelo, de la materia orgánica, del tipo de cultivo y del régimen de humedad/lluvia para predecir la eficiencia agronómica relativa de la roca fosfórica con respecto a los fertilizantes fosfatados solubles en agua. La versión actual del modelo no es capaz de determinar si el P es un factor limitante o cual deberá ser la dosis de fertilizante fosfatado. Además asume que otros nutrientes y las plagas no son limitantes y no considera ninguna evaluación socioeconómica.

#### *Un ejemplo del empleo del actual sistema de apoyo a la toma de decisiones del IFDC*

El sistema del IFDC debe predecir cuan eficiente será la roca fosfórica de Minjingu (República Unida de Tanzania) para aumentar el rendimiento de maíz en un suelo de Kabete, Kenya (Singh *et al.*, 2003). El sistema requería los siguientes datos: la solubilidad en citrato de amonio de la roca fosfórica de reactividad media (8,45 por ciento de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> de la roca fosfórica), el pH en el agua del suelo (5,02), el contenido de carbono orgánico del suelo (1,44 por ciento), el contenido de arcilla (25 por ciento) y de arena (38 por ciento), la cantidad de lluvia durante la estación de cultivo (800 mm) y el tipo de cultivo (maíz). El sistema predijo una eficiencia agronómica relativa de 85 por ciento para la roca fosfórica de Minjingu. Singh *et al.* (2003) informaron que los valores observados de eficiencia agronómica relativa en esta localidad variaron de 68 a 100 por ciento con valores entre 80 a 90 por ciento para la cuarta aplicación anual.

### Los sistemas «experto»

Se pueden también utilizar los sistemas «experto» para desarrollar un sistema de apoyo a la toma de decisiones. No requieren los años de investigación aplicada que se necesitan para desarrollar los modelos mecanísticos. En cambio, requieren los esfuerzos de un experto «ingeniero del conocimiento», que empleará su tiempo trabajando con los especialistas en roca fosfórica y otros expertos que tengan una gran experiencia de campo. Los investigadores australianos utilizaron esta metodología para construir un sistema a fin de recomendar la utilización de la roca fosfórica en las pasturas. La tarea fue determinar donde las rocas fosfóricas podrían ser efectivas sobre las praderas pastoreadas por ganado lanar y vacuno en las áreas de alta precipitación en el este y sur de Australia.

#### *El sistema «asesor de roca fosfórica reactiva» en Australia*

Este sistema «experto» fue construido sobre los resultados de un gran proyecto nacional que consistió de 25 experimentos de campo con repeticiones en los suelos representativos de las regiones seleccionadas. El proyecto generó valores anuales de sustitución del superfosfato triple por la roca fosfórica de Carolina del Norte de alta reactividad en cada sitio durante un período de cuatro años. El parámetro VS50 es la cantidad de P en kilogramos suministrada como superfosfato triple que produjo el 50 por ciento de la máxima respuesta de rendimiento del cultivo a la aplicación de P en el sitio particular dividida por la cantidad de P en kilogramos aportada como roca fosfórica de Carolina del Norte requerida para producir el mismo rendimiento en el mismo sitio.

El proyecto proporcionó una descripción del comportamiento de las rocas fosfóricas en un rango de ambientes pastorales que variaban en precipitación pluvial, propiedades de los suelos y tipos de pasturas. En los ambientes estudiados la roca fosfórica Carolina del Norte fue: (i) tan eficiente como el superfosfato triple a partir del primer año, (ii) casi tan eficiente como el superfosfato triple a partir de cierto tiempo y, (iii) completamente ineficiente comparada con el superfosfato triple. El efecto del tiempo fue tomado en cuenta ya que la eficiencia agronómica de la roca fosfórica fue medida después de uno y cuatro años de las aplicaciones anuales de roca fosfórica. Un «ingeniero del conocimiento» utilizó entonces esta información empírica conjuntamente con la comprensión científica de la forma como las cuatro variables ambientales determinaban la eficiencia agronómica de la roca fosfórica para construir un sistema «experto» llamado «asesor de roca fosfórica reactiva», que puede aconsejar a los agricultores australianos a utilizar las rocas fosfóricas reactivas en las pasturas (Gillard *et al.*, 1997).

La metodología adoptada para la construcción del sistema «asesor de roca fosfórica reactiva» fue asignar un peso ponderado a cada factor de clima o de suelo que parecía influenciar el comportamiento de la roca fosfórica. Estos incluyeron: la reactividad de la roca fosfórica, la lluvia, el pH del suelo, la textura del suelo, la probabilidad de lixiviación de P del fertilizante fosfatado soluble en agua, la capacidad de retención de P del suelo y la composición de la pastura. Cada factor fue determinado independientemente, con una predicción general obtenida multiplicando en conjunto todos los pesos ponderados de los factores.

El sistema «experto» ha logrado proporcionar predicciones exactas de los valores VS50 que ocurrieron (el coeficiente de correlación entre valores VS50 predichos y observados fue 0,92) (Gillard *et al.*, 1997). También ha sido posible validar los resultados de un cierto número de experimentos de campo independientes utilizando las respuestas de rendimiento de las pasturas a la roca fosfórica y al superfosfato. Las variables necesarias para el sistema experto fueron simples y no requerían de análisis de laboratorios especializados. Las variables de sitio fueron: la precipitación anual, la probabilidad de que el P soluble pueda lixivarse de la zona radicular y la composición



de la pastura. Las variables requeridas de suelo fueron: el pH, el P-Colwell, la textura y el color del suelo como sustitutos para estimar la capacidad de retención de P del suelo.

Los investigadores encontraron algunas sugerencias útiles para emplear el sistema de apoyo a la toma de decisiones por ordenadores. Como no había ningún derecho de propiedad intelectual comercial, el sistema «asesor de roca fosfórica reactiva» ha sido colocado libre de costo en el sitio Internet: [www.latrobe.edu.au/www/rpr](http://www.latrobe.edu.au/www/rpr). Esto ha facilitado ampliamente su utilización. Además, intercambiando comentarios y mensajes es posible explicar como ha sido tomada una decisión. Una buena asistencia puede ayudar al usuario a utilizar el sistema con confianza.

Los agricultores en Australia han recibido un sistema de apoyo a la toma de decisiones más simplificado bajo la forma de un cuestionario. La lista de preguntas sirve para recolectar información sobre las condiciones probables que puedan tener como resultado una utilización efectiva de la roca fosfórica en las pasturas de Australia. Si todas las preguntas pueden ser respondidas afirmativamente, entonces hay una gran probabilidad de que las rocas fosfóricas reactivas sean útiles como fertilizantes fosfatados en el sitio pastoral específico.

#### *Un ejemplo del empleo del «asesor de roca fosfórica reactiva»*

Un productor de carne vacuna en el sur de Gippsland, un distrito de alta precipitación en el sureste de Australia, quiso determinar si una roca fosfórica reactiva podría ser un fertilizante fosfatado efectivo en comparación al superfosfato para mantener la productividad de las pasturas de trébol blanco y ballica (raigrás) perenne. El agricultor bajó de Internet el sistema «asesor de roca fosfórica reactiva» y respondió a las preguntas hechas por el sistema. Las respuestas fueron: la precipitación anual era de 1 000 mm, la roca fosfórica a ser usada era altamente reactiva, el suelo no era rojo o laterítico (indicando que la capacidad de retención de P no era alta), la textura era arenosa, y el pH del agua del suelo era 5,3. Inseguro sobre el significado de la pregunta sobre el grado de lixiviación de P en el suelo, el agricultor controló el documento de ayuda y recibió una explicación breve. El agricultor entonces respondió que era posible tener una lixiviación moderada. El sistema respondió que la roca fosfórica altamente reactiva sería tan efectiva como el superfosfato a partir del primer año si el agricultor cambiaba a una roca fosfórica reactiva. Esta predicción corresponde con el comportamiento de la roca fosfórica reactiva en ambientes similares en el sur de Australia. El sistema entonces recomendó al productor de hacer un análisis económico de la selección en base al costo por kilogramo del P aplicado. Además, el sistema notificó sobre una posible deficiencia de azufre en el suelo si se utiliza una roca fosfórica reactiva simple sin la adición de azufre.

### **REQUERIMIENTOS PARA UN SISTEMA GLOBAL DE APOYO A LA TOMA DE DECISIONES PARA LA UTILIZACIÓN DE LA ROCA FOSFÓRICA**

Heng (2003) ha descrito el marco conceptual (Figura 24) para el desarrollo futuro de un sistema global de apoyo a las decisiones de roca fosfórica. Es posible indicar un cierto número de pasos y una serie de directivas para desarrollar este tipo de sistema. Dicho sistema se necesita ahora para asesorar sobre la eficiencia de aplicación de las rocas fosfóricas en los cultivos alimenticios y comerciales en las zonas tropicales y subtropicales, particularmente en los países en desarrollo.

#### **Creación de un banco de datos sobre la reactividad de las rocas fosfóricas**

Las propiedades intrínsecas de los minerales que contienen fosfatos varían considerablemente. Por lo tanto, la caracterización estandarizada del potencial agronómico de las rocas fosfóricas es el primer paso, esencial para evaluar su idoneidad para la aplicación directa así como para desarrollar un sistema de apoyo a las decisiones

completo y poder recomendar la utilización de la roca fosfórica. Las tareas específicas comprenden: (i) coleccionar datos sobre la solubilidad de la roca fosfórica en ácido cítrico neutro (segunda extracción) siguiendo procedimientos normalizados (velocidad y tiempo de agitación determinados), (ii) correlacionar los datos de la solubilidad obtenidos con otros datos disponibles de las pruebas de reactividad con las mismas rocas fosfóricas, (iii) realizar un análisis de regresión para establecer la relación entre los dos métodos bajo estudio, (iv) analizar los datos atípicos (erráticos) utilizando procedimientos estándar y, (v) analizar todas las muestras restantes utilizando procedimientos normalizados.

La División Mixta FAO/OIEA de Técnicas Nucleares en la Agricultura y la Alimentación y el IFDC compartirán sus colecciones de datos sobre las propiedades de la roca fosfórica a fin de crear un banco general de datos para el sistema de apoyo a las decisiones sobre roca fosfórica. Durante varios años el IFDC ha realizado un gran número de ensayos de campo en África, Asia y América Latina y ha acumulado un gran número de datos. De la misma manera, a través de una red internacional de investigación sobre la roca fosfórica ejecutada de 1993-1999 en los países desarrollados y en desarrollo, la División Mixta FAO/OIEA de Técnicas Nucleares en la Agricultura y la Alimentación ha coleccionado información valiosa sobre la efectividad agronómica de los fertilizantes fosfatados con una variedad de fuentes de roca fosfórica y numerosos cultivos en un amplio rango de localidades (Zapata, 2000, 2003; IAEA, 2002).

### Creación de un banco de datos de suelos para la utilización de la roca fosfórica

Asimismo se necesita una caracterización estandarizada de las muestras de suelo provenientes de las regiones donde las rocas fosfóricas podrían ser utilizadas a fin de proveer informaciones de base confiables para el sistema de apoyo a la toma de decisiones. Esto comprenderá coleccionar mediciones de las principales propiedades de los suelos que afectan la disolución de las rocas fosfóricas. Una caracterización estandarizada de las rocas fosfóricas y los suelos fue llevada a cabo por la División Mixta FAO/OIEA de Técnicas Nucleares en la Agricultura y la Alimentación en el marco del proyecto de investigación «El uso de las técnicas nucleares y conexas para evaluar la eficiencia agronómica de los fertilizantes fosfatados, en particular las rocas fosfóricas» (Truong y Zapata, 2002; Montange y Zapata, 2002).

### Otros requerimientos

Las informaciones sobre el comportamiento de la roca fosfórica que son empleadas para construir un sistema de apoyo a la toma de decisiones necesitan cubrir un rango completo de rocas fosfóricas, climas, tipos de suelo y sistemas agrícolas que pueden ser probablemente encontrados en la región seleccionada. Por ejemplo, si se necesita un sistema para ciertas regiones de África, toda la información posible sobre el comportamiento de la roca fosfórica en aquellas regiones deberá ser incorporada en el sistema de apoyo a la toma de decisiones. Esto incluirá los factores socioeconómicos que son una parte integral del sistema agrícola. Estos pueden determinar muy bien si una roca fosfórica local podría ser utilizada en una situación específica de cultivo. Existe una nueva perspectiva de que las aplicaciones de los sistemas deben enfocar los problemas reales que enfrentan los agricultores en general e intentar desarrollar soluciones para ellos (Matthews *et al.*, 2002). La búsqueda de las fuentes rentables (eficientes en costo) de los nutrientes para los cultivos para combatir el empobrecimiento en nutrientes de los suelos es un problema complejo en todos los países en vías de desarrollo.

Las informaciones requeridas para el sistema de apoyo a la toma de decisiones deben ser simples y capaces de ser proporcionadas por los usuarios potenciales. No resulta práctico pedir mediciones complejas del suelo tal como capacidad tampón del pH como una variable para el sistema si el usuario no tiene ninguna idea sobre su medición

y si esta sólo puede ser obtenida en un laboratorio de investigación. El color del suelo, la textura, el pH y la lluvia son ejemplos de variables fácilmente obtenibles.

Asimismo debe existir una estrecha colaboración entre el grupo que construye el sistema y los investigadores que están evaluando las rocas fosfóricas en el campo. El primer grupo necesita recibir toda la información posible acerca del comportamiento y el ambiente en que se utilizó la roca fosfórica mientras que el otro grupo debe proporcionar toda la información posible acerca del comportamiento de la roca fosfórica para su incorporación en el sistema de apoyo a la toma de decisiones. Los investigadores planificando una evaluación de la roca fosfórica en el campo deben consultar con los especialistas que están desarrollando el sistema a fin de determinar si un tratamiento adicional podría ser incluido en el experimento de campo que luego puede ser útil en el desarrollo del mismo.

### **Futuro desarrollo**

El IFDC y la FAO/OIEA han acordado colaborar en el desarrollo de un sistema global de apoyo a la toma de decisiones para las rocas fosfóricas. Los planes para este desarrollo están en marcha en términos de la creación de un banco de datos de las rocas fosfóricas simplificado a partir de la gran cantidad de información disponible. El desarrollo posterior requerirá el procesamiento de datos adicionales para establecer las relaciones funcionales y estadísticas para luego ser incluidas en el sistema.

Una red de ensayos piloto y de experimentos de validación en campo será también establecida en un amplio rango de zonas agroecológicas. Estos experimentos serán localizados en sitios seleccionados en África, Asia y América Latina para recolectar informaciones a nivel de los sistemas de cultivo, incluyendo el manejo agronómico y los datos socioeconómicos. Esto permitirá un mejoramiento de la predicción de los resultados esperados y de la toma de las decisiones. El sistema de apoyo a la toma de decisiones resultante será luego desarrollado como un sistema para ser montado en la red mundial para comunicar los resultados a través de Internet. Esto facilitará la distribución de los recursos, la adhesión a las normas colectivas y la utilización de los instrumentos y estándares desarrollados por el Centro Mundial de Información Agrícola (*World Agricultural Information Center*).

La disponibilidad de un sistema global de apoyo a la toma de decisiones para las rocas fosfóricas será de utilidad como instrumento de investigación y de extensión para los investigadores, los extensionistas, los agricultores, los planificadores y los distribuidores comerciales de los productos agrícolas. Ello ayudará a promover la utilización de los recursos de la roca fosfórica en los países en desarrollo de las zonas tropicales y subtropicales.



## Capítulo 8

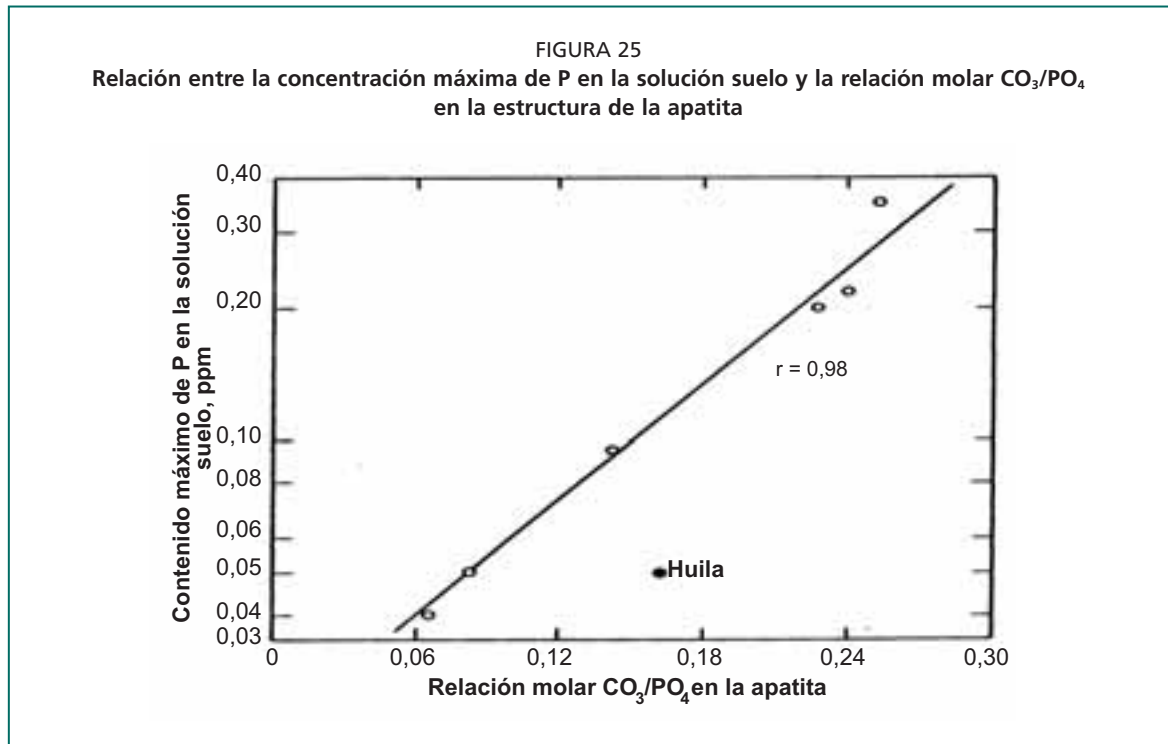
# Los nutrientes secundarios, los micronutrientes, el efecto del encalado y los elementos peligrosos asociados con la utilización de las rocas fosfóricas

Se recomienda aplicar la roca fosfórica en los suelos ácidos donde el fósforo es un nutriente esencial que limita el crecimiento de las plantas. Durante los últimos 50 años se ha observado una acumulación importante de conocimientos sobre los factores que afectan la eficiencia agronómica de la roca fosfórica para su aplicación directa. Sin embargo, existe menos información sobre otros efectos asociados con la utilización de la roca fosfórica, es decir el suministro de los nutrientes secundarios y de los micronutrientes, el efecto del encalado y de los elementos peligrosos. Este capítulo presenta una revisión de la información disponible en la literatura que trata de estos efectos.

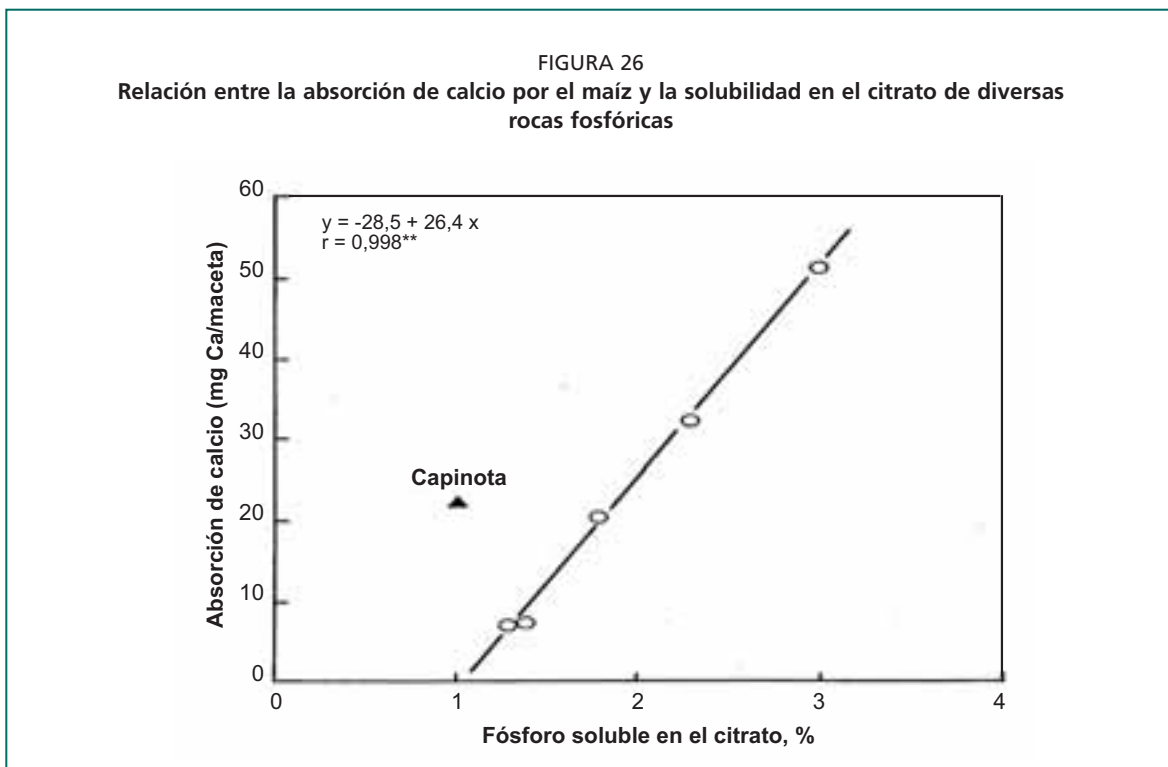
### LOS NUTRIENTES SECUNDARIOS EN LAS ROCAS FOSFÓRICAS

Entre las limitaciones químicas y nutricionales importantes para el crecimiento de los cultivos en los suelos ácidos se hallan las deficiencias de los elementos nutritivos calcio y magnesio. Como el mineral apatita en la roca fosfórica es del tipo P-Ca puede potencialmente proveer el nutriente Ca, siempre que haya condiciones favorables para la disolución de la apatita. Además, muchas fuentes de roca fosfórica contienen carbonatos libres tales como la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) y la dolomita ( $\text{MgCO}_3$ ), que también pueden proporcionar Ca y Mg en los suelos ácidos. Sin embargo, si la solubilización de los carbonatos libres aumenta significativamente el pH y el Ca intercambiable alrededor de las partículas de la roca fosfórica, esto puede impedir la disolución de la apatita y entonces reducir la disponibilidad del P de la roca fosfórica (Chien y Menon, 1995b). Por ejemplo, Chien (1977b) encontró que la roca fosfórica de Huila (Colombia) que contenía un 10 por ciento de  $\text{CaCO}_3$  aumentó el pH de 4,8 a 6,2 en una semana en comparación con otras rocas fosfóricas que aumentaron el pH a 5,1. En consecuencia, la concentración máxima de P en la solución suelo obtenida con la roca fosfórica de Huila fue más baja que aquella obtenida con la roca fosfórica de Florida Central (Figura 25), aún cuando las dos rocas fosfóricas tienen aproximadamente el mismo grado de sustitución isomórfica de  $\text{PO}_4$  por  $\text{CO}_3$  en la estructura de la apatita.

Hellums *et al.* (1989) informaron sobre el valor agronómico potencial del Ca en algunas rocas fosfóricas de América del Sur y del África occidental. En este estudio un nivel adecuado de P fue aplicado como  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  a un suelo ácido franco arenoso, de bajo Ca intercambiable para aislar el efecto del Ca del efecto del P. Los resultados mostraron que la absorción de Ca por un cultivo de maíz a partir de las diversas fuentes de roca fosfórica siguió el orden de la reactividad de las rocas fosfóricas, excepto para la roca fosfórica de Capinota (Bolivia) que contenía un 10 por ciento de  $\text{CaCO}_3$  (Figura 26). La efectividad agronómica relativa de las diversas fuentes de roca fosfórica con respecto al  $\text{CaCO}_3$  (100) en términos de incremento de la producción de materia seca y del Ca absorbido varió de 28 a 89 por ciento y de 8 a 58 por ciento, respectivamente (Cuadro 26). Los resultados mostraron que las rocas fosfóricas de reactividad media a



Fuente: Chien, 1977a.



Fuente: Hellums *et al.*, 1989.

alta tienen un valor potencial de Ca, además de su utilización como fuente de P, cuando son aplicadas directamente a los suelos ácidos de bajo Ca intercambiable.

En un ensayo de campo de tres años conducido en la China central, Hu *et al.* (1997) informaron que el Ca intercambiable se incrementó de 1 194 mg/kg en el control a 1 300 – 2 100 mg/kg en los tratamientos con la roca fosfórica. Los niveles

CUADRO 26

**Eficiencia Agronómica Relativa (EAR) de diversas rocas fosfóricas como fuente de calcio para el cultivo del maíz en comparación con el CaCO<sub>3</sub>**

Fuente de Ca	Reactividad	EAR (%)	
		Rendimiento de materia seca	Absorción de Ca
RF de Bahía Inglesa (Chile)	Alta	89	58
RF de Bayovar (Perú)	Alta	73	33
RF de Capinota (Bolivia)	Baja	52	17
RF de Tilemsi (Malí)	Media	53	17
RF de Tahoua (Níger)	Baja	31	8
RF de Hahotoe (Togo)	Baja	28	8
CaCO <sub>3</sub>		100	100

Fuente: Hellums et al. 1989.

correspondientes de Mg intercambiable fueron 330 mg/kg en el control y 350-400 mg/kg en los tratamientos con la roca fosfórica. Debido a que el contenido de Mg ligado a la apatita es muy pequeño (a diferencia del Ca ligado a la apatita) se espera que la roca fosfórica no aumentará significativamente el nivel de Mg intercambiable del suelo a menos de que la roca contenga una cantidad importante de dolomita. Es necesario realizar investigaciones adicionales para obtener informaciones sobre el valor agronómico del Ca y del Mg, especialmente de este último elemento.

Algunas fuentes de roca fosfórica pueden contener una cantidad importante de minerales accesorios que contienen azufre (S), por ejemplo el yeso (CaSO<sub>4</sub>) en la roca fosfórica de Israel (Axelrod y Gredinger, 1979) y la pirita (FeS<sub>2</sub>) y la pirrotita (FeS) en la roca fosfórica de Mussoorie, India (PPCL, 1983). Sin embargo hay poca información sobre la disponibilidad del S para las plantas a partir de estas fuentes de roca fosfórica.

### LOS MICRONUTRIENTES EN LAS ROCAS FOSFÓRICAS

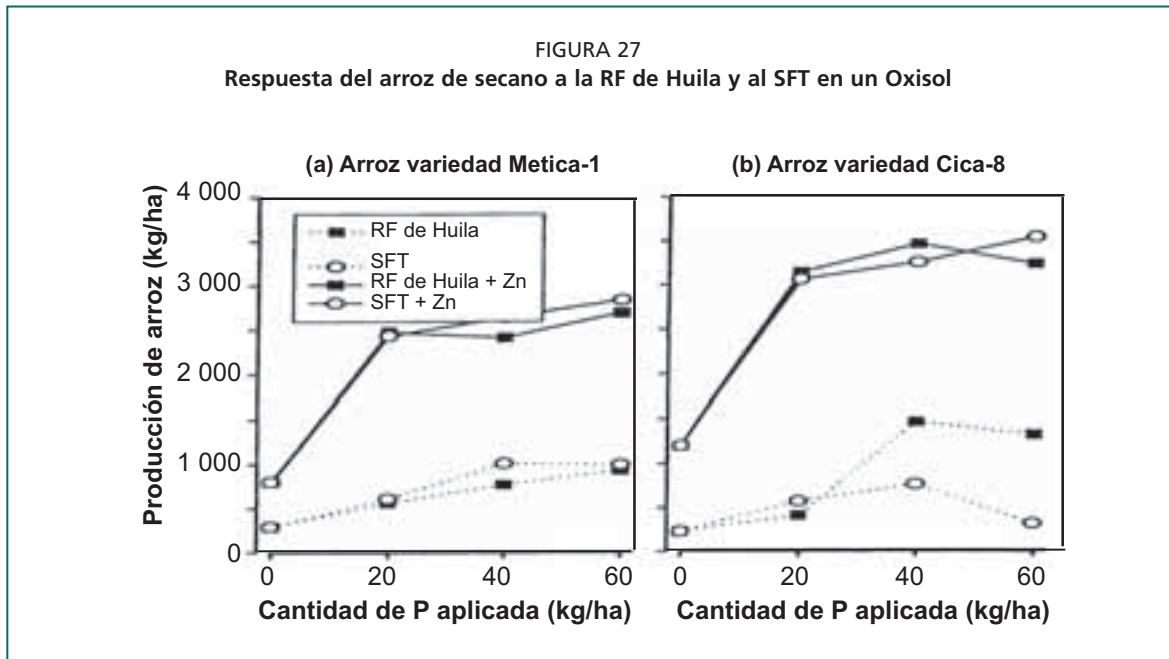
Algunas rocas fosfóricas contienen minerales accesorios que pueden proporcionar micronutrientes para el crecimiento de las plantas. Sin embargo, existe poca información disponible sobre este beneficio adicional potencial de la aplicación directa de la roca fosfórica.

El resultado del trabajo de Hammond *et al.* (1986b) en un oxisol de Colombia indicó que la roca fosfórica local de Huila que contiene 136 mg de zinc (Zn) por kilogramo produjo un rendimiento de grano más alto de la variedad de arroz Cica 8 que el superfosfato triple debido a su contenido de Zn (Figura 27). Sin embargo el Zn disponible de la roca fosfórica de Huila no fue suficiente para proveer una cantidad adecuada de Zn a otras dos variedades de arroz. Cuando se aplicó Zn al suelo, ambos fertilizantes, la roca fosfórica de Huila y el superfosfato triple fueron igualmente eficientes para aumentar el rendimiento de grano del arroz.

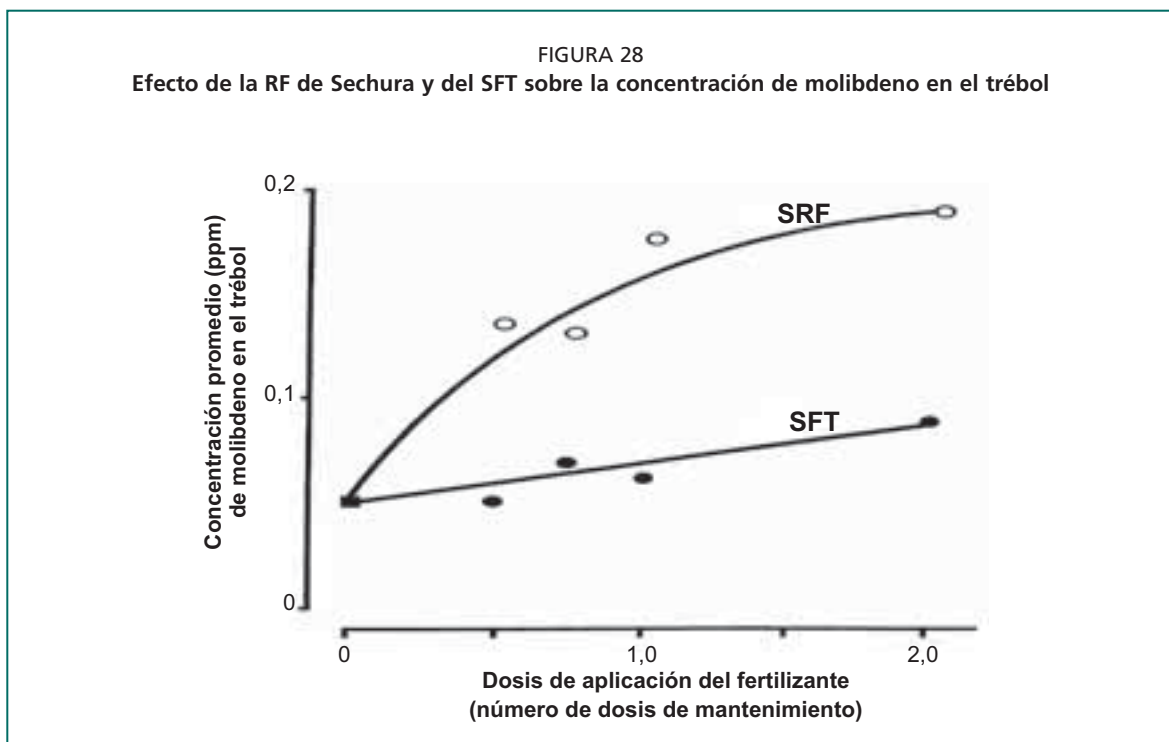
En Nueva Zelanda, Sinclair *et al.* (1990) encontraron que la roca fosfórica de Sechura (Perú), que contiene 43 mg de molibdeno (Mo) por kilogramo produjo mayores incrementos de los rendimientos de materia seca de las pasturas que el superfosfato triple en los sitios donde la roca fosfórica aumentó significativamente los niveles de Mo en el trébol (Figura 28). Se necesita mayor información sobre los contenidos de los micronutrientes de las rocas fosfóricas y su potencial para incrementar la producción de los cultivos en los suelos ácidos.

### EFECTO DEL ENCALADO ASOCIADO AL USO DE LAS ROCAS FOSFÓRICAS

Un bajo pH asociado a niveles tóxicos de aluminio (Al) y de manganeso (Mn) frecuentemente contribuye a la pobre fertilidad del suelo para el crecimiento de las plantas en los suelos ácidos tropicales y subtropicales en los países en vías de desarrollo.



Fuente: Hammond *et al.*, 1986b.



Fuente: Sinclair *et al.*, 1990.

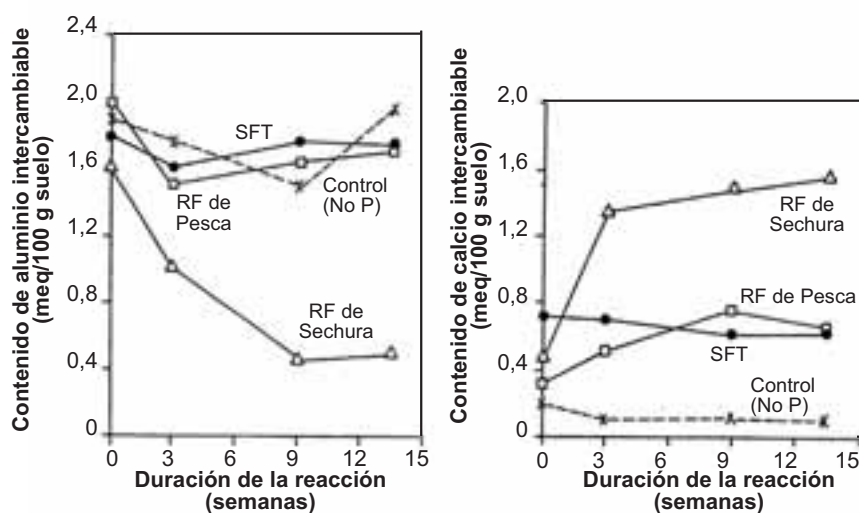
Si bien la aplicación de cal (encalado) es eficaz para disminuir la acidez del suelo y la toxicidad del Al, esta no se encuentra a menudo disponible o su transporte es muy caro. La selección de especies y variedades de los cultivos para identificar aquellas que son tolerantes a la acidez del suelo reduciría las necesidades de cal (Sánchez y Salinas, 1981; Goedert, 1983).

La disolución de la apatita en la roca fosfórica consume iones  $H^+$  y puede aumentar el pH del suelo dependiendo de la reactividad de la roca fosfórica. Si una roca fosfórica

contiene una cantidad importante de carbonatos libres, puede además aumentar el pH del suelo. Sin embargo, si bien un aumento del pH del suelo puede reducir el nivel de saturación de Al, ello también puede, al mismo tiempo, disminuir la disolución de la apatita. La condición óptima sería un pH del suelo que sea suficientemente alto para reducir el nivel de saturación de Al pero todavía suficientemente bajo para que la disolución de la apatita pueda liberar el fósforo.

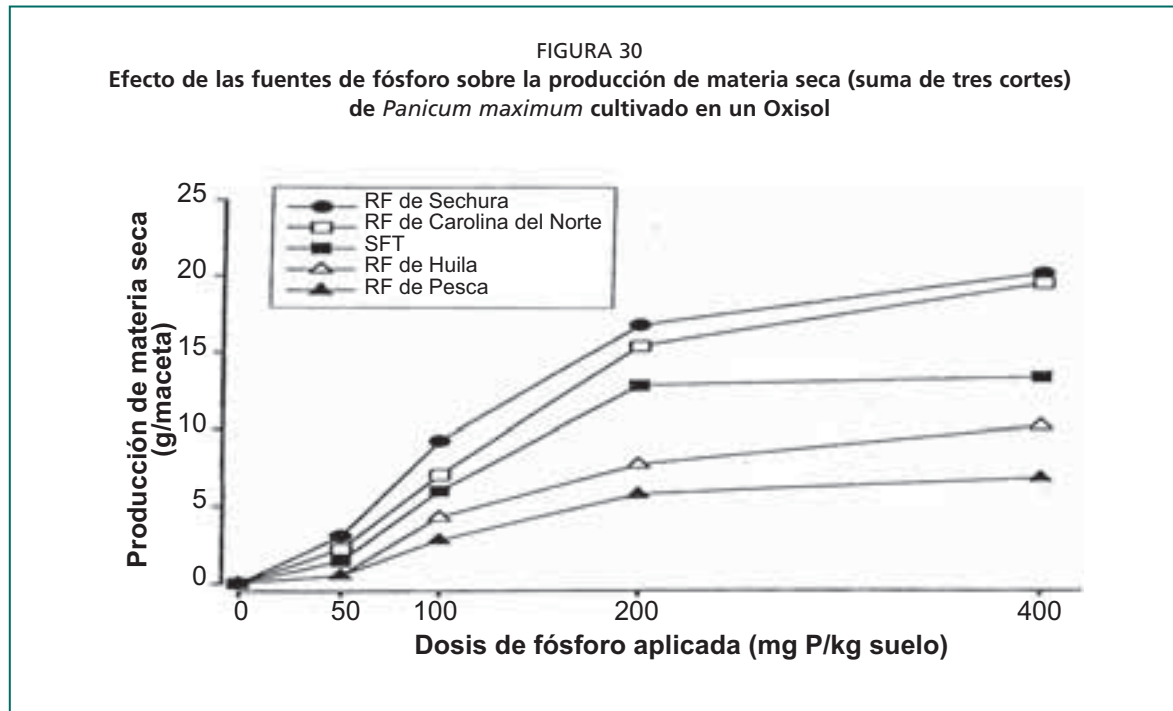
Una investigación hecha por el IFDC ha mostrado que la aplicación de las rocas fosfóricas de reactividad media a alta con bajo contenido de carbonatos libres puede tener como resultado importantes efectos de encalado en los suelos ácidos. Si bien el incremento de pH es generalmente menor de 0,5 unidades, la disminución de Al intercambiable puede ser significativa cuando el pH del suelo es menor de 5,5 (Chien y Friesen, 2000) ya que en los oxisoles y ultisoles el nivel del Al intercambiable sería casi cero en este pH (Pearson, 1975). Por ejemplo el contenido de Al intercambiable fue reducido de 2,0 a 0,4 meq/100 g cuando un oxisol de Colombia fue tratado con la roca fosfórica de Sechura en un estudio de incubación de suelo (Figura 29). Asimismo el pH del suelo aumentó de 4,6 a 5,0 y el Ca intercambiable de 0,2 a 1,5 meq/100 g. Por lo tanto el nivel de saturación de Al también disminuyó de 80 a 20 por ciento. El mejor comportamiento de las rocas fosfóricas altamente reactivas, por ejemplo Sechura y Carolina del Norte, en términos de respuesta de la planta en comparación con el superfosfato triple puede estar relacionada a la disminución de la toxicidad de Al (Figura 30). En un ensayo de campo de cinco años en un oxisol fertilizado con diversas fuentes de roca fosfórica, Chien *et al.* (1987b) informaron que el pH aumentó de 4,1 en el control a 4,7-5,0 en los tratamientos con la roca fosfórica. El incremento correspondiente en el Ca intercambiable fue de 0,17 cmol/kg en el control a 0,31-0,56 cmol/kg en los tratamientos con la roca fosfórica. Sin embargo, no se observó ningún efecto significativo sobre el Al intercambiable. En su estudio en un suelo rojo de China, Hu *et al.* (1997) informaron que el pH aumentó de 4,8 en el control a 4,9-5,3 en los tratamientos con la roca fosfórica. Se observó también una reducción del Al intercambiable de hasta 70 por ciento en los tratamientos con la roca fosfórica con respecto al control. Los estudios sugieren que la aplicación de la roca fosfórica a los

FIGURA 29  
Evolución del aluminio y del calcio intercambiables durante la incubación de un Oxisol tratado con RF y SFT (200 mg P/kg)



Fuente: Chien, 1982.





Fuente: Chien, 1982.

suelos ácidos puede también mejorar las propiedades del suelo así como proporcionar P disponible para la producción de los cultivos.

Sikora (2000) realizó un estudio teórico y experimental para calcular y cuantificar el efecto potencial de encalado de las rocas fosfóricas mediante la titulación en el laboratorio y la incubación en el suelo. De los tres aniones ( $\text{PO}_4$ ,  $\text{CO}_3$  y F) presentes en la estructura de la apatita de la roca fosfórica, el  $\text{CO}_3$  y el  $\text{PO}_4$  pueden consumir iones  $\text{H}^+$  y causar un aumento del pH. Debido a que la cantidad de moles de los iones  $\text{PO}_4$  es mayor en relación al  $\text{CO}_3$ , el  $\text{PO}_4$  tiene un mayor influencia sobre el potencial de encalado de la roca fosfórica. Los resultados de la titulación de dos rocas fosfóricas (Carolina del Norte, de alta reactividad e Idaho, de baja reactividad) mostraron que los rangos de equivalencia del carbonato de calcio fueron de 39,9 a 53,7 por ciento, por lo tanto, menores que los valores teóricos (59,5 a 62,0 por ciento). El modelo experimental obtenido del estudio de incubación estuvo conforme a la teoría en forma cualitativa ya que mostró un incremento de la capacidad de encalado con el incremento del P disuelto de las rocas fosfóricas. Sin embargo, el modelo produjo un porcentaje más bajo de equivalente de carbonato de calcio que los cálculos teóricos para un rango de P disuelto variando de 20 a 60 por ciento. Se necesitan más investigaciones para comparar los modelos de equivalente de carbonato de calcio en una variedad de tipos de suelo con el fin de evaluar el efecto potencial de encalado asociado al uso de la roca fosfórica.

### LOS ELEMENTOS QUÍMICOS PELIGROSOS EN LAS ROCAS FOSFÓRICAS

Todas las rocas fosfóricas poseen elementos químicos peligrosos que comprenden los metales pesados, por ejemplo el cadmio (Cd), el cromo (Cr), el mercurio (Hg) y el plomo (Pb), así como elementos radioactivos, por ejemplo el uranio (U), que son considerados tóxicos para la salud humana y animal (Mortvedt y Sikora, 1992; Kpombrekou y Tabatabai, 1994b). Los contenidos de estos elementos peligrosos varían ampliamente entre las fuentes de rocas fosfóricas y aún dentro del mismo depósito. El Cuadro 27 muestra los resultados del análisis químico de los elementos potencialmente peligrosos en algunas muestras de rocas fosfóricas sedimentarias (Van Kauwenbergh, 1997).

CUADRO 27

**Análisis químico de elementos potencialmente peligrosos en rocas fosfóricas sedimentarias**

País	Depósito	Reactividad	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	As	------(mg/kg)-----				Hg (µg/kg)	U (mg/kg)	V
					Cd	Cr	Pb	Se			
Argelia	Djebel Onk	Alta	29,3	6	13	174	3	3	61	25	41
Burkina Faso	Kodjari	Baja	25,4	6	<2	29	<2	2	90	84	63
China	Kaiyang	Baja	35,9	9	<2	18	6	2	209	31	8
EE.UU.A.	Carolina del Norte	Alta	29,9	13	33	129	3	5	146	41	19
EE.UU.A.	Florida Central	Media	31,0	6	6	37	9	3	371	59	63
India	Mussoorie	Baja	25,0	79	8	56	25	5	1 672	26	117
Jordania	El Hassa	Media	31,7	5	4	127	2	3	48	54	81
Malí	Tilemsi	Media	28,8	11	8	23	20	5	20	123	52
Marruecos	Khouribga	Media	33,4	13	3	188	2	4	566	82	106
Níger	Parc W	Baja	33,5	4	<2	49	8	<2	99	65	6
Perú	Sechura	Alta	29,3	30	11	128	8	5	118	47	54
Senegal	Taiba	Baja	36,9	4	87	140	2	5	270	64	237
Siria	Khneifiss	Media	31,9	4	3	105	3	5	28	75	140
Tanzania	Minjingu	Alta	28,6	8	1	16	2	3	40	390	42
Togo	Hahotoe	Baja	36,5	14	48	101	8	5	129	77	60
Túnez	Gafsa	Alta	29,2	5	34	144	4	9	144	12	27
Venezuela	Riécito	Baja	27,9	4	4	33	<2	2	60	51	32

Fuente: Van Kauwenbergh, 1997.

Entre los metales pesados peligrosos presentes en los fertilizantes fosfatados, el cadmio es probablemente el elemento más investigado debido a su toxicidad potencialmente alta para la salud humana en los alimentos derivados de cultivos tratados con fertilizantes fosfatados que contienen una cantidad importante de cadmio. La mayoría de los estudios sobre la absorción de cadmio por los cultivos han utilizado fertilizantes fosfatados solubles en agua tales como el superfosfato triple, el superfosfato simple, el fosfato diamónico y el fosfato monoamónico. Sin embargo, la reacción del cadmio en el suelo tratado con la roca fosfórica es bastante diferente de aquella de los fertilizantes fosfatados solubles en agua debido a que el Cd ligado a la apatita en la roca fosfórica es insoluble en agua. Iretskaya *et al.* (1998) informaron que la roca fosfórica de Carolina del Norte de alta reactividad conteniendo 47 mg Cd/kg fue tan efectiva para incrementar el rendimiento de grano del arroz de secano como el superfosfato triple producido de la misma roca fosfórica pero la concentración de Cd en el grano de arroz en el tratamiento con la roca fosfórica fue solamente la mitad de aquella medida con el superfosfato simple. Por esta razón, las informaciones sobre la disponibilidad de Cd de las fuentes fosfatadas solubles en agua no pueden ser empleadas directamente para la aplicación de la roca fosfórica.

La reactividad de la roca fosfórica influencia la disponibilidad de cadmio para la planta debido a que el Cd está ligado al P en la estructura de la apatita (Sery y Greaves, 1996). Para separar el efecto de P sobre la disponibilidad de Cd en la roca fosfórica, Iretskaya *et al.* (1998) trataron previamente dos suelos ácidos con 200 mg P/kg como KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> de tal manera que no se espere respuesta al fósforo de la roca fosfórica en términos de aumento del rendimiento de grano del arroz de secano. Encontraron que la absorción total de Cd por el arroz a partir de la roca fosfórica de Togo, de baja reactividad, fue 80 por ciento de la reactividad de la roca fosfórica de Carolina del Norte, altamente reactiva en un suelo de pH 5,0 y 52 por ciento en un suelo de pH 5,6 cuando los suelos fueron tratados con 400 µg de Cd/kg de las dos rocas fosfóricas. McLaughlin *et al.* (1997) encontraron que para las mismas dosis de P, las concentraciones de Cd en el trébol crecido en un suelo tratado con la roca fosfórica de Hamrawein (Egipto) de baja reactividad conteniendo 5,3 mg Cd/kg fueron más bajas que las medidas en el trébol crecido en un suelo tratado con la roca fosfórica de Carolina del Norte altamente reactiva conteniendo 40,3 mg Cd/kg. Una fuente de

roca fosfórica con más alta reactividad y mayor contenido de Cd puede liberar más Cd para la absorción por las plantas que una roca fosfórica de más baja reactividad y/o menores contenidos de Cd. Además de la reactividad y del contenido de cadmio de la roca fosfórica, la absorción de Cd por la planta también depende de las propiedades del suelo, especialmente del pH y de la especie vegetal (Iretskaya y Chien, 1999). Es necesario realizar más investigaciones para estudiar sus interacciones e integrar estos factores sobre la disponibilidad de Cd asociada al uso de la roca fosfórica.

Algunas rocas fosfóricas pueden contener una cantidad importante de elementos radioactivos en comparación con otras fuentes de roca fosfórica, por ejemplo la roca fosfórica de Minjingu (Tanzanía) contiene 390 mg U/kg comparados con 12 mg U/kg en la roca fosfórica de Gafsa (Túnez) (Cuadro 27). Como la roca fosfórica de Minjingu es altamente reactiva y adecuada agronómica y económicamente para su aplicación directa a los suelos ácidos para la producción agrícola (Jama *et al.*, 1997; Weil, 2000), ha habido interés por conocer la seguridad en la utilización de esta roca fosfórica. Para ello muestras de suelo y planta tratadas con esta roca fosfórica fueron recolectadas por el Centro Internacional para Investigación en Agroforestería (ICRAF) y enviadas al Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) para medir su radioactividad. Los resultados mostraron que la radioactividad de las muestras de suelo y planta fue casi la misma que los niveles de radiación de base. Sin embargo el problema de seguridad continúa siendo una preocupación para el personal que trabaja en la mina.

La mayoría de las rocas fosfóricas también tienen altas concentraciones de fluor (F) en los minerales de apatita, excediendo a menudo el 3 por ciento en peso (250 mg F/kg P). Una absorción excesiva de F está relacionada con daños causados al ganado en pastoreo debido a la fluorosis. McLauhlin *et al.* (1997) informaron que no había diferencias significativas en los contenidos de F en las pasturas de las parcelas fertilizadas con el superfosfato simple conteniendo 1,7 por ciento de F y los de las parcelas tratadas con la roca fosfórica de Carolina del Norte conteniendo 3,5 por ciento de F o entre los sitios que habían recibido ambos fertilizantes. Las concentraciones de F en el pasto fueron generalmente menores de 10 mg F/kg y a menudo cerca del límite de detección para la técnica de análisis (1 mg F/kg). Concluyeron que es poco probable que la absorción de F por la planta, en la mayoría de los suelos, cause problemas a los animales en pastoreo. Sin embargo advirtieron que la ingestión de suelo por los animales o de material fertilizante que queda sobre el pasto después de una alta aplicación en superficie podría afectar la salud de los animales dependiendo de las concentraciones de F del suelo y del fertilizante. Es necesario controlar el contenido de F en las rocas fosfóricas aplicadas por largo tiempo en los suelos ácidos.

## Capítulo 9

# Técnicas para mejorar la eficiencia agronómica de las rocas fosfóricas

Los Capítulos 5 y 7 muestran que el comportamiento agronómico de las rocas fosfóricas aplicadas directamente como fertilizantes fosfatados depende de varios factores y de sus interacciones. Los principales factores comprenden: (i) las propiedades físicas y químicas de las rocas fosfóricas, (ii) los factores de suelo y de clima, (iii) la especie vegetal y los sistemas de cultivo y, (iv) las prácticas de manejo de la explotación agrícola. Existen situaciones donde las rocas fosfóricas aplicadas directamente no son efectivas. En estos casos, es posible utilizar diversos medios para incrementar su eficiencia agronómica y así hacer que los productos sean económicamente más atractivos. Este capítulo discute las diversas posibilidades que existen como métodos biológicos, químicos y físicos.

### MÉTODOS BIOLÓGICOS

Los métodos biológicos para mejorar la eficiencia agronómica de las rocas fosfóricas aplicadas directamente como fertilizantes fosfatados son: (i) la compostación de los residuos orgánicos con la roca fosfórica (fosfocompostes), (ii) la inoculación de las semillas o de las plántulas con microorganismos solubilizadores de fosfatos (hongos, bacterias y actinomicetos) y, (iii) la inclusión en el sistema de cultivos de genotipos de plantas que poseen un mejor crecimiento radicular y, por lo tanto, un mayor volumen de exploración del suelo, exudan protones y ácidos orgánicos que incrementan la solubilización de los fosfatos poco solubles mediante la disminución del pH y la quelación y/o producen niveles altos de las enzimas fosfatasas que pueden descomponer las formas de fósforo orgánico en P inorgánico.

### Los fosfocompostes

El procesamiento de las rocas fosfóricas con diversos materiales orgánicos y su compostación es una técnica promisoría para mejorar la solubilidad y la subsecuente disponibilidad de P de las rocas fosfóricas para las plantas. La tecnología es particularmente atractiva cuando: (i) se dispone de rocas fosfóricas de reactividad media a alta pero no son adecuadas para la producción de fertilizantes enteramente acidulados como el superfosfato triple o el superfosfato simple, (ii) se aplican en forma rutinaria abonos orgánicos para mantener la materia orgánica del suelo y para complementar los requerimientos en elementos nutritivos (como en la mayoría de suelos tropicales), (iii) se practica una agricultura orgánica que excluye el uso de fertilizantes procesados químicamente y, (iv) se deben eliminar de manera segura para el medio ambiente los residuos urbanos y de la explotación agrícola. Los productos compostados con la roca fosfórica son comúnmente llamados fosfocompostes.

### *Principios de la fosfocompostación*

La fosfocompostación está basada en el principio de que durante la descomposición de los materiales orgánicos se produce una intensa actividad microbiana. Muchos tipos de bacterias y hongos dan como resultado la producción de un gran número de ácidos orgánicos y sustancias húmicas. Algunos de los ácidos orgánicos más comúnmente producidos son: cítrico, málico, fumárico, succínico, pirúvico, tartárico, oxalacético, 2-ketoglucónico, láctico-oxálico, propiónico y butírico (Stevenson, 1967).

El término «sustancias húmicas» es un nombre genérico dado a un gran número de polímeros orgánicos, amorfos y coloidales formados durante la descomposición de la materia orgánica. Las sustancias húmicas son de alto peso molecular y generalmente más estables que los ácidos orgánicos. Las sustancias húmicas pueden ser divididas en tres grandes fracciones según su solubilidad en los ácidos y/o las bases. La fracción que es soluble en los ácidos y las bases se llama ácido fúlvico, la que es soluble en las bases pero precipita en los ácidos es el ácido húmico y la que es insoluble en los ácidos y las bases es la humina. Entre estas, la fracción de los ácidos fúlvicos tiene el más bajo peso molecular seguida por los ácidos húmicos y las huminas.

El aumento de la liberación de fósforo de las rocas fosfóricas parece ser una función de la acidificación de la roca fosfórica por los ácidos orgánicos y sobre todo de su capacidad para quelatar el calcio, el hierro y el aluminio (Pohlman y McColl, 1986). La mayor capacidad de los ácidos orgánicos en comparación a los ácidos minerales de concentración comparable para liberar el P de la roca fosfórica y la evidencia directa de su capacidad quelante ha sido documentada (Johnston, 1954a, 1954b; Kpombrekou y Tabatabai, 1994a). Otro factor importante en la liberación del P de la roca fosfórica es la participación de los grupos OH en los ácidos orgánicos. Por ejemplo se ha mostrado que el ácido cítrico con tres grupos carboxilo (COOH) y un grupo OH fue capaz de disolver más P de la roca fosfórica que el ácido cis-aconítico con tres grupos carboxilo pero sin el grupo OH (Kpombrekou y Tabatabai, 1994a).

El ácido fúlvico es el producto más reactivo de las sustancias húmicas para la adsorción de cantidades importantes de  $\text{Ca}_2^+$  y la liberación de iones  $\text{H}^+$  y, por lo tanto, aumentan la disolución de la roca fosfórica. El ácido húmico puede formar complejos con el P y el Ca y crear un sumidero para la disolución posterior de la roca fosfórica (Singh y Amberger, 1990). La aplicación de las sustancias húmicas al suelo también aumenta el P disponible para las plantas compitiendo por los sitios de retención de los iones P o formando una cubierta protectora sobre estos sitios. Un beneficio adicional que resulta de la aplicación del fosfocomposte es el movimiento del P disuelto a una mayor profundidad de suelo, lo que permite la exploración de un volumen de suelo más grande para la absorción de P por las plantas.

#### *Consideraciones prácticas sobre la fosfocompostación*

Abonos orgánicos es un término amplio que comprende los estiércoles de ganado, los excrementos de otros animales, los residuos de cultivos, los compostes rurales y urbanos y otros desechos animales. La concentración de los nutrientes en los materiales orgánicos es variable. Si bien la mayoría de estos materiales contiene cantidades importantes de nitrógeno (N), poseen poco P (Cuadro 28). La eficacia de los compostes para solubilizar

CUADRO 28  
Contenido de elementos nutritivos en algunos residuos orgánicos y en compostes (en base a materia seca, excepto para la orina)

Categoría	Fuente	Contenido de nutrientes (%)		
		N	P	K
Residuos animales	Estiércol de vaca	0,7	0,5	2,31
	Orina de ganado	0,8	<0,01	0,03
	Estiércol de oveja y de cabra	2,0	0,51	2,32
	Suelo negro	1,2	0,35	0,21
	Restos de cuero	7,0	0,04	0,10
Estiércol de granja	Estiércol de granja	0,8	0,08	0,25
Compostes/residuos vegetales	Estiércol de pollo	2,9	1,26	0,97
	Composte urbano	1,8	0,44	0,62
	Composte rural	0,8	0,09	0,21
	Paja de arroz	0,6	0,08	2,10
	Hojas y cortes	3,0	0,30	3,50



la roca fosfórica varía con el tipo y composición de los residuos orgánicos y con su grado de descomposición. Esta eficacia es una función de la magnitud de la producción de los ácidos orgánicos y de las sustancias quelantes en el composte, lo que a su vez resulta de las actividades metabólicas de los microorganismos, incluyendo bacterias, hongos y actinomicetos. Hay estudios que indican que los materiales vegetales tales como las hojas trozadas, los residuos de cultivo (paja de cereales) y las hierbas cortadas y compostadas con los desechos animales son preferibles porque producen más ácidos orgánicos y sustancias húmicas. La compostación de la roca fosfórica con la gallinaza no es una opción adecuada ya que este estiércol contiene grandes cantidades de carbonato de calcio y otros compuestos alcalinos que impiden la disolución de la roca fosfórica (Mahimairaja *et al.*, 1995).

Subba Rao (1982b) ha proporcionado algunos consejos prácticos para la fosfocompostación de los residuos de cultivos:

- coleccionar los residuos vegetales tales como paja de cereales, tallos y hojas y crear una masa heterogénea a compostar mezclando dos o tres tipos de materiales.
- cortar/picar los materiales en trozos pequeños de preferencia 50-70 mm, a fin de aumentar su área superficial.
- ajustar la relación carbono/nitrógeno (C/N) inicial a 30-35. Una relación C/N más baja promueve la volatilización del amoníaco mientras que una más alta retarda la tasa de descomposición.
- mezclar los residuos vegetales con los estiércoles animales y suelo en una proporción 70:20:10.
- mezclar con la roca fosfórica en una proporción de hasta 30 por ciento en peso de la mezcla.
- mantener la humedad cerca de 60 por ciento (en peso) y la temperatura a 50-60 °C.

La descomposición de los materiales orgánicos puede ser acelerada mediante la inoculación microbiana del composte (por ejemplo, *Aspergillus* spp., *Penicillium* spp., *Trichoderma viride*, *Cellulomonas* spp. y *Cytophaga* spp.) y la adición de fuentes de energía (melaza) a los residuos antes de la compostación (Singh y Amberger, 1991).

Una proporción de cuatro partes de residuos orgánicos y una parte de la roca fosfórica (en base de peso seco) parece ser una combinación eficaz. Singh y Amberger (1991) investigaron la disolución de dos rocas fosfóricas sedimentarias (Mussoorie e Hyperhos) aplicadas por separado. Incubaron la roca fosfórica mezclada con la paja de trigo en una proporción 1:4 e inocularon la mezcla con un extracto de suelo y composte y también ajustaron la relación C/N con orina. Los autores informaron que en 30 días la disolución de la roca fosfórica se incrementó en 7 por ciento del P total para el Hyperhos y en 15 por ciento para la roca fosfórica de Mussoorie. La adición de melazas aumentó la solubilidad del fósforo en un 3 por ciento adicional para ambas rocas fosfóricas.

#### ***La efectividad agronómica del fosfocomposte***

Se puede esperar un incremento en la efectividad agronómica de la roca fosfórica en el fosfocomposte con respecto a la de la roca fosfórica aplicada directamente debido a su mayor contenido de fósforo soluble en el ácido cítrico y agua que estará disponible para las plantas. Además, las fracciones solubles de P estimulan el crecimiento radicular y facilitan una mayor explotación del suelo enriquecido con P (Chien *et al.*, 1987a; Rajan y Watkinson, 1992; Habib *et al.*, 1999). Los trabajos publicados sobre la efectividad agronómica de los fosfocompostes parecen ser escasos.

Un fosfocomposte preparado mezclando los residuos de la finca, el estiércol de ganado y suelo (como fuente de inoculante bacterial) fue tan bueno como el superfosfato simple (Bangar *et al.*, 1985; Palaniappan y Natarajan, 1993). Todas las fuentes de P fueron aplicadas en base equivalente al P total a un suelo tropical a los

CUADRO 29

Efecto de las fuentes fosfatadas sobre el rendimiento de las leguminosas frijol mungo (*Vigna radiata*) y guar (*Cyamopsis tetragonoloba*)

Tratamiento	Frijol mungo t/ha		Guar t/ha	
	Grano	Paja	Grano	Paja
Control	1,47	5,10	0,54	1,90
Roca fosfatada de Mussoorie	1,57	5,40	0,68	2,16
Superfosfato simple	1,64	5,65	0,82	2,53
Fosfocomposte	1,83	6,15	0,84	2,63
Composte solo	1,69	5,50		
Composte + Roca fosfatada de Mussoorie	1,67	5,75		
LSD (p = 0,05)	0,14	0,67	0,18	0,38

Nota: Todas las fuentes fueron aplicadas a una dosis equivalente a 17,3 kg/ha.

cultivos de guandul (*Cajanus cajan*), frijol mungo (*Vigna radiata*), guar (*Cyamopsis tetragonoloba*), trigo y mijo perla. En valores de pH más altos de 7,5, donde no se espera que se disuelva la roca fosfórica aplicada directamente, el fosfocomposte fue tan eficiente como el superfosfato simple (Cuadro 29) (Mishra y Bangar, 1986). Sin embargo, en estos estudios las fuentes de P fueron aplicadas a una sola dosis de P, lo que reduce el valor de los resultados.

#### *Las necesidades de investigación futura*

La fosfocompostación ofrece las ventajas de emplear las rocas fosfóricas que no serían utilizables y de eliminar los residuos orgánicos de manera segura para el medio ambiente. En las situaciones donde se utilizan los abonos orgánicos o estos son una alternativa viable a los fertilizantes químicos (Mugwira *et al.*, 2002) la fosfocompostación presenta ventajas. Por otro lado si el fosfocomposte debe ser aplicado principalmente como fuente de P, los beneficios necesitan ser evaluados con respecto al costo de preparación y aplicación. Se necesitan realizar trabajos de investigación para determinar científicamente la cantidad mínima de composte requerida para solubilizar la roca fosfórica a un nivel donde el producto sea económicamente tan eficiente como los fertilizantes fosfatados solubles en agua. El programa de investigación debe incluir rocas fosfóricas de diferentes reactividades y diversas combinaciones de los residuos orgánicos disponibles localmente.

### La inoculación de plántulas con endomicorrizas

#### *Principios básicos*

El término micorriza se refiere a la asociación simbiótica entre las raíces de las plantas y los hongos. En la naturaleza, la mayoría de las plantas forman asociaciones de micorriza de un tipo u otro con los hongos del suelo, donde el hongo ejecuta la función de los pelos radicales. El tipo de micorriza que mejora la absorción de P por las plantas es la micorriza vesículo-arbuscular y las micorrizas comúnmente utilizadas son *Glomus fasciculatum*, *G. mosseae*, *G. etunicatum*, *G. tenue* y *Gigaspora margarita*. Las micorrizas vesículo-arbusculares infectan las células de la corteza radicular y forman una red interna y un crecimiento exterior de hifas. Poseen estructuras especiales conocidas como vesículas y arbuscúlos. Los arbuscúlos son altamente ramificados y ayudan en la transferencia de los nutrientes del hongo hacia las células de la raíz de la planta mientras que las vesículas son estructuras en forma de bolsas que almacenan el fósforo como fosfolípidos.

Las micorrizas vesículo-arbusculares se hallan geográficamente en todas partes y ocurren en un amplio rango ecológico, desde los ambientes acuáticos hasta los desérticos (Mosse *et al.*, 1981; Bagyaraj, 1990). Las micorrizas vesículo-arbusculares

colonizan las plantas que pertenecen a las familias de la mayoría de los cultivos agrícolas. Las familias que raramente forman micorrizas vesículo-arbusculares son las crucíferas, las quenopodiáceas, las poligonáceas y las ciperáceas.

Miyasaka y Habte (2001) han revisado la integración de las micorrizas vesículo-arbusculares en los sistemas de cultivo a fin de mantener los rendimientos y reducir los aportes de insumos fosfóricos.

### *Maneras de acción*

El aumento de la absorción de P en las plantas infectadas por las micorrizas sería facilitado por (i) las hifas fungales que exploran un mayor volumen de suelo por fósforo e interceptan un mayor número de fuentes puntuales de fósforo, (ii) los hongos que disuelven los minerales fosfatados de poca solubilidad (por ejemplo la roca fosfórica) y, (iii) las raíces infectadas por las micorrizas mejoran la tasa de absorción del P mediante el aumento de la gradiente de difusión, la disminución del P en solución a concentraciones más bajas que lo pueden hacer las raíces no micorrizadas y el incremento de la transferencia de P entre las raíces vivas y desde las raíces muertas a las vivas (Bolan y Robson, 1987; Sylvia, 1992; Frossard *et al.*, 1995; Lange Ness y Vlek, 2000; Brundrett, 2002). Se calcula que las tasas de transporte de P de las raíces micorrizadas son de dos a seis veces las de las raíces no micorrizadas (Jones *et al.*, 1998).

El efecto de plantas micorrizadas en relación a no micorrizadas sobre la absorción de P varía con la dosis de aplicación de fósforo, siendo la absorción generalmente mejor a los niveles bajos e intermedios de la aplicación de P (Ortas *et al.*, 1996; Sari *et al.*, 2002). La infección modifica la curva de respuesta al fósforo de tal manera que presenta una pendiente más pronunciada y alcanza un máximo a niveles bastante más bajos de P aplicado, ya sea en forma de fosfato soluble en agua o de poca solubilidad como en la roca fosfórica. Si bien algunos investigadores (Murdoch *et al.*, 1967) han concluido que la eficiencia es mayor con los fertilizantes de baja solubilidad (por ejemplo las rocas fosfóricas), dichas conclusiones parecen ser el resultado de los procedimientos usados con una o dos dosis de aplicación de P en lugar de varias dosis (Pairunan *et al.*, 1980). Para que las micorrizas sean eficientes es necesario alcanzar una cierta concentración límite de P en la solución suelo (Bolan y Robson, 1987) la que puede ser tan baja como 0,02 mg/litro (Manjunath y Habte, 1992). De la misma manera, altas concentraciones de P en la solución pueden reducir el nivel de infección de la micorriza (Kucey *et al.*, 1989).

### *Aplicación de la tecnología para aumentar la disponibilidad de P de la roca fosfórica*

En comparación con las plantas no micorrizadas, Pairunan *et al.* (1980) informan que las plantas micorrizadas aumentan la eficiencia de los fertilizantes en un 30 por ciento, incluyendo la de la roca fosfórica. Como los hongos de la micorriza infectan las plantas de la mayoría de las familias, el objetivo debe ser introducir en las plantas los hongos endófitos más eficientes. Hay estudios que indican que la introducción de micorrizas vesículo-arbusculares adecuadas puede aumentar tres veces los rendimientos de grano del arroz en comparación a los tratamientos no inoculados (Secilia y Bagyaraj, 1992). Arihara y Karasawa (2000) informaron que bajo condiciones de campo, el rendimiento y la absorción de P por el maíz aumentaron cuando fue sembrado después de cultivos micorrizados.

Han sido estudiados diversos métodos para introducir los inóculos de micorrizas en los cultivos de campo, por ejemplo cubriendo las semillas con los inóculos y colocando los inóculos en el campo debajo de las semillas en los surcos. La manera más atractiva y práctica de emplear los inóculos se presenta con los cultivos de propagación vegetativa y/o los cultivos transplantados. En esta situación los productores deben incorporar los inóculos en las bandejas de transplante y en las camas de los almácigos. Las plántulas crecidas así serán colonizadas por los hongos introducidos y luego pueden ser transplantadas al campo. Este método ha sido utilizado con éxito en

India en cultivos de importancia agronómica (chile, mijo africano, tomate, cítricos y mango) y en especies forestales (por ejemplo, *Tamarindus indica* y *Acacia nilotica*). Las micorrizas están comercialmente disponibles en algunos países como la India. La inoculación de micorrizas vesículo-arbusculares para cultivar plántulas de cítricos se usa comercialmente en los Estados Unidos de América (Menge *et al.*, 1977).

#### **Investigaciones futuras**

Es evidente que las micorrizas vesículo-arbusculares aumentan la absorción del P de las rocas fosfóricas por ciertas plantas (Pairunan *et al.*, 1980; Barea *et al.*, 1983; Toro *et al.*, 1997; Yusdar y Hanafi, 2003). Esta tecnología es particularmente promisoría en cultivos en almácigos, bandejas y bolsas de polietileno y que luego son transplantados definitivamente al campo. Es necesario realizar investigaciones adicionales para integrar las micorrizas en los sistemas de cultivo con el fin específico de utilizar la roca fosfórica como fertilizante fosfatado. Es necesario evaluar los efectos cuantitativos de las cepas seleccionadas de hongos sobre la absorción del P de las rocas fosfóricas por los cultivos en relación a los suelos naturales no inoculados. Dichos estudios deben incluir: rocas fosfóricas de diferente reactividad, un fertilizante fosfatado soluble en agua como producto de referencia y diferentes dosis de aplicación de P de tal manera que se puedan graficar las curvas de respuesta. Los estudios deben ser realizados en condiciones de campo para poder calcular la relación beneficio/costo del uso de la roca fosfórica con y sin micorrizas vesículo-arbusculares en comparación a los fertilizantes fosfatados solubles en agua. Como hay evidencia que las especies de micorrizas son altamente específicas al huésped y variables en su respuesta al ambiente mineral de los suelos (Bever *et al.*, 2001; Ortas *et al.*, 2002), los programas de investigación deben considerar estos parámetros.

#### **Uso de las ectomicorrizas**

Las ectomicorrizas se encuentran generalmente sobre especies forestales perennes de las familias como las betuláceas, dipterocarpaceas, fagáceas, mirtáceas, pináceas y salicáceas. Las ectomicorrizas son descritas como una asociación raíz-hongo, en la que el hongo crece como una cubierta o manto sobre la superficie de las raíces. La red de hifas se extiende dentro de la corteza radicular de las plantas pero está confinada a los espacios intercelulares (a diferencia de las micorrizas vesículo-arbusculares), forman estructuras intracelulares y producen una red de interconexión llamada red de Hartig. A partir del manto, las hifas se extienden en el suelo y aumentan el transporte de fosfato y de agua hacia las plantas hospedantes (Duddridge *et al.*, 1980). Esto ayuda a mejorar la disponibilidad de P de los fertilizantes de liberación lenta como la roca fosfórica. El hongo asociado de la ectomicorriza puede ser cultivado en medio sintético para fines de inoculación. Castellano y Molina (1989) presentan en detalle los procedimientos para la producción de los inoculantes y la inoculación de almácigos.

#### **Uso de los microorganismos solubilizadores de fosfatos**

Se ha encontrado que un grupo de microorganismos heterotróficos solubiliza las formas inorgánicas de P mediante la excreción de ácidos orgánicos que disuelven los minerales fosfatados y/o la quelación directa de los cationes asociados a los iones fosfato, liberando el P en la solución suelo (Halder *et al.*, 1990; Gaur, 1990; Bojinova *et al.*, 1997; He *et al.*, 2002). Algunos microorganismos importantes incluyen las bacterias *Bacillus megaterium*, *B. circulans*, *B. subtilis*, *B. polymyxa* y *Pseudomonas striata*. Los hongos incluyen *Aspergillus awamori*, *Penicillium bilaii*, *P. digitatum* y *Trichoderma* sp. En los análisis de los filtrados de los cultivos se han identificado un número de ácidos orgánicos tales como los ácidos láctico, glicólico, cítrico, 2-ketoglucónico, málico, oxálico, malónico, tartárico y succínico, todos los que poseen propiedades quelantes (Kucey *et al.*, 1989).

Los ensayos de campo en India y en la ex-Unión Soviética han demostrado que el uso de los microorganismos solubilizadores de fosfato puede aumentar los rendimientos de los cultivos hasta un 70 por ciento (Verma, 1993; Wani y Lee, 1992; Subba Rao, 1982a). Los cultivos incluían la avena, mostaza, remolacha azucarera, col, tomate, cebada, trébol de Alejandría, maíz, papa, arroz, garbanzo, soya y maní. Estudios *in vitro* han demostrado la disolución de la roca fosfórica por los microorganismos solubilizadores de fosfatos (Barea *et al.*, 1983). Los resultados de los ensayos de invernadero han indicado una mejor respuesta del trigo y la cebolla a la aplicación de la roca fosfórica cuando las semillas o plántulas fueron inoculadas con esos microorganismos. El incremento en crecimiento es mayor cuando las micorrizas vesículo-arbusculares y los microorganismos solubilizadores de fosfatos son aplicados combinados que cuando estos organismos son empleados por separado (Young, 1990; Toro *et al.*, 1997; Singh y Kapoor, 1999). Es probable que esos microorganismos disuelvan el fósforo de poca solubilidad, el que es tomado por los micelios de las micorrizas vesículo-arbusculares a través de diferentes procesos, incluyendo la liberación de los ácidos orgánicos (Illmer *et al.*, 1995) y la solubilización de los fosfatos de calcio (Illmer y Scinner, 1995)

### *Las necesidades de investigación*

Es evidente que los microorganismos solubilizadores de fosfatos, especialmente en combinación con las micorrizas vesículo-arbusculares aumentan la efectividad agronómica de las rocas fosfóricas (Barea *et al.*, 2002). Los microorganismos están disponibles comercialmente en algunos países, por ejemplo en India, donde la producción en gran escala de esos microorganismos está en marcha, haciendo cultivos en grandes depósitos sobre agitadores rotatorios o en fermentadores en serie. Sin embargo no es evidente que estos organismos puedan incrementar la efectividad agronómica de las rocas fosfóricas bajo las condiciones estándares de campo en tal grado que la roca fosfórica puede ser utilizada como un fertilizante alternativo. Se deben establecer experimentos de campo en localidades específicas para realizar un análisis científico riguroso de la utilidad práctica de los microorganismos solubilizadores de fosfatos y de las micorrizas vesículo-arbusculares para incrementar la efectividad agronómica de las rocas fosfóricas y, por lo tanto, promover su amplia utilización.

### **Utilización de los genotipos de las plantas**

La eficiencia de la absorción de fósforo puede ser aumentada mediante la selección de genotipos vegetales que presenten diversos mecanismos para una mejor absorción del fósforo bajo condiciones de bajo nivel fosfórico, tales como (i) un mayor crecimiento radicular, permitiendo así la exploración de un mayor volumen de suelo, (ii) la exudación de protones y de ácidos orgánicos lo que incrementa la solubilidad de los fosfatos poco solubles mediante la disminución del pH y/o la quelación y, (iii) la producción de altos niveles de las enzimas fosfatasas, que pueden descomponer el fósforo orgánico a inorgánico (Miyasaka y Habte, 2001). Otro método es utilizar plantas tolerantes a la toxicidad de Al (Ishikawa *et al.*, 2000).

Incrementando la acidez del suelo en la rizósfera es posible aumentar la disolución de la roca fosfórica y la disponibilidad del fósforo para las plantas. Esto ha sido observado directamente como consecuencia de un aumento de la disolución de la roca fosfórica pero, más a menudo indirectamente, como un aumento de la absorción de P por aquellas plantas que acidifican su rizósfera (Bekele *et al.*, 1983; Hedley *et al.*, 1983; Moorby *et al.*, 1988; Gahoonia *et al.*, 1992; Haynes, 1992; Nakamaru *et al.*, 2000). Hinsinger y Gilkes (1995) y Habib *et al.* (1999) también han encontrado un aumento de la disolución de la roca fosfórica por la rizósfera de algunas especies de cultivos en los suelos alcalinos. La secreción de protones por las raíces ocurre cuando la suma equivalente de cationes absorbidos por las plantas ( $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  y  $Na^+$ ) excede la de los aniones (generalmente,  $NO_3^-$ ,  $H_2PO_4^-$ ,  $SO_4^{2-}$ , y  $Cl^-$ ). La acidificación del suelo en la



rizósfera es mayor para las leguminosas fijadoras de nitrógeno que acumulan nitrógeno como  $\text{NH}_3$  mediante la simbiosis con microorganismos del género *Rhizobium*. Por esta razón las leguminosas son particularmente adecuadas para fertilizar con roca fosfórica.

Las raíces de algunas plantas como la colza pueden también aumentar la disolución de la roca fosfórica mediante la secreción de ácidos orgánicos tales como los ácidos málico, cítrico, oxálico y 2-ketoglucónico, que pueden ligar los cationes de la roca fosfórica (Ca, Al y Fe) además de disminuir el pH de la rizósfera del suelo (Moghimi y Tate, 1978; Hoffland *et al.*, 1989; Zapata *et al.*, 1996; Nakamaru *et al.*, 2000; Montenegro y Zapata, 2002).

Las estrategias para mejorar la eficiencia agronómica de la roca fosfórica consisten en el empleo de genotipos de aquellos cultivos que poseen una alta acidez en la rizósfera tales como las leguminosas -fijadoras de N y secretadoras de ácidos- en cultivos asociados como leguminosas de grano o en mezcla en las praderas mixtas como leguminosas forrajeras, las que aumentarán la disolución de la roca fosfórica y proveerán fósforo disponible para las plantas vecinas. Una alternativa es incluir estas plantas en la rotación de los cultivos de tal manera de que se disuelva roca fosfórica adicional y entre en el grupo de P lábil del suelo.

Una nueva estrategia consiste en mejorar genéticamente las especies de las plantas existentes para aumentar la secreción radicular de protones y de ácidos orgánicos. De la Fuente *et al.* (1997) informaron de un aumento de la secreción de citrato en las raíces de tabaco como resultado de la inserción de un gene para la síntesis de citrato obtenido de *Pseudomonas aeruginosa*. Es necesario realizar más investigaciones explorando la posibilidad de introducir genes que producen ácidos en aquellas plantas que poseen baja capacidad de utilización de la roca fosfórica. Recientemente, se ha propuesto una estrategia combinada, que consiste en buscar genotipos de los cultivos que sean tolerantes al aluminio (Al) y eficientes en la absorción de P para desarrollar sistemas de cultivo sostenibles para los suelos ácidos de las zonas tropicales y subtropicales (Hocking, 2001; Keerthisinghe *et al.*, 2001).

## MÉTODOS QUÍMICOS

### Acidulación parcial de la roca fosfórica

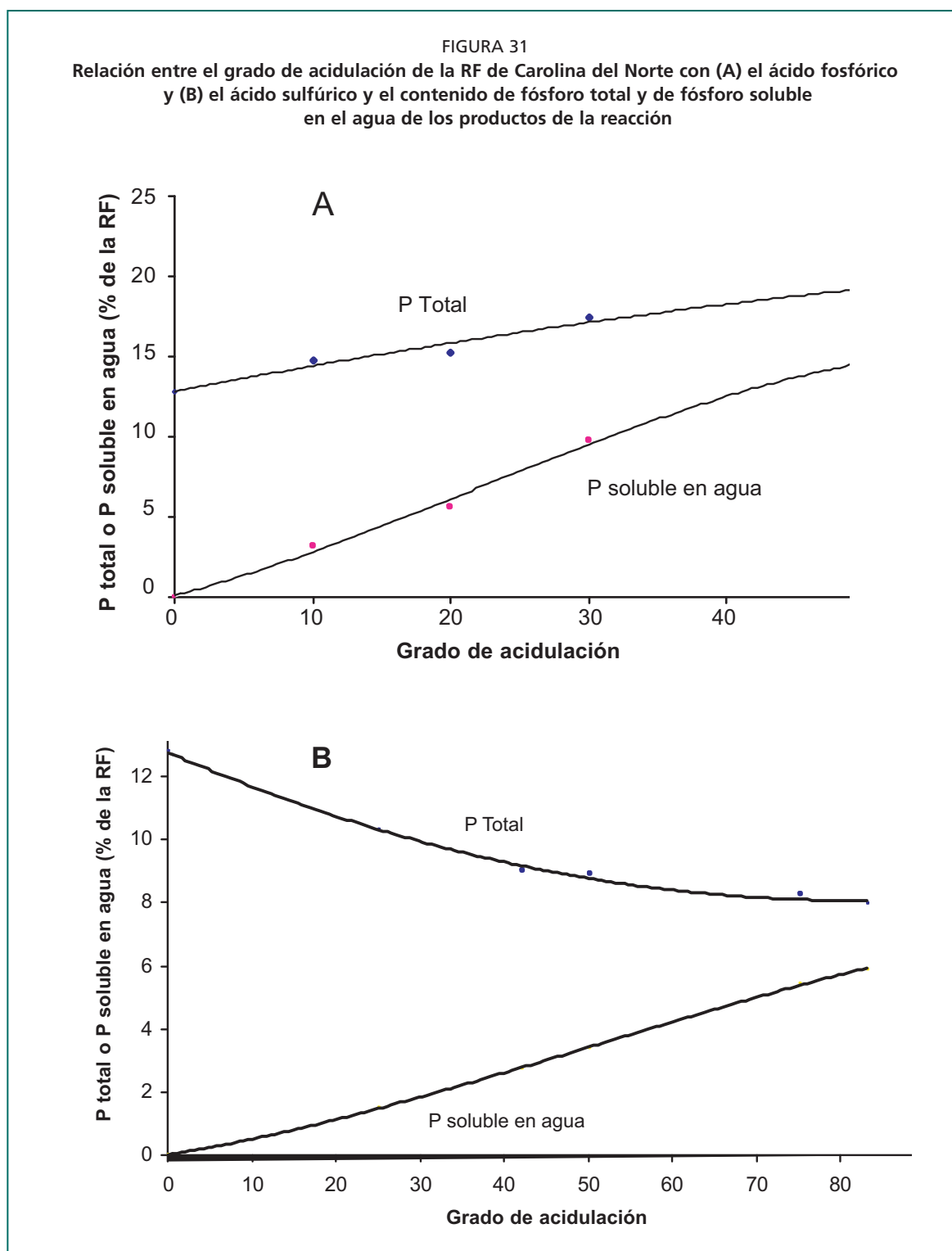
Las rocas fosfóricas parcialmente aciduladas son obtenidas haciendo reaccionar las rocas fosfóricas generalmente con ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) o ácido fosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) en cantidades menores que las necesitadas para producir el superfosfato triple o el superfosfato simple, respectivamente. El uso de las rocas fosfóricas parcialmente aciduladas se ha propagado en Europa y América del Sur desde que Nordengren (1957) informó acerca de su uso. Las rocas fosfóricas parcialmente aciduladas pueden ofrecer un medio económico de aumentar la eficiencia agronómica de las fuentes locales de roca fosfórica que de otra manera no serían adecuadas para la aplicación directa. Por esta razón, una gran cantidad de estudios han sido y continúan a ser realizados a nivel internacional (Hammond *et al.*, 1986b; Rajan y Marwaha, 1993; Chien y Menon, 1995a; Chien, 2003b; Zapata, 2003). Las rocas fosfóricas parcialmente aciduladas son menos costosas que los fertilizantes fosfatados (solubles en agua) completamente acidulados debido a que se necesitan cantidades menores de ácido y de energía por unidad de P en el producto. Además, las rocas fosfóricas parcialmente aciduladas son a menudo más concentradas que el superfosfato simple. En algunas situaciones la acidulación parcial puede ser un medio preferido para mejorar la eficiencia de las rocas fosfóricas importadas.

### Selección del nivel de acidulación parcial y del ácido

El nivel de acidulación de la roca fosfórica está generalmente mencionado en porcentaje. Por ejemplo, cuando se utiliza un quinto del ácido sulfúrico requerido para preparar

superfosfato simple de una roca fosfórica particular, el producto se denomina RFPA-20 por ciento  $H_2SO_4$ . El término RFPA-20 por ciento  $H_3PO_4$  se refiere a la roca fosfórica parcialmente acidulada preparada utilizando 20 por ciento del  $H_3PO_4$  requerido para producir el superfosfato triple.

La Figura 31 ilustra la relación entre el nivel de acidulación de una roca fosfórica reactiva (roca fosfórica de Carolina del Norte) con el  $H_3PO_4$  o el  $H_2SO_4$  y los contenidos de P total y de P soluble en agua del producto. Como el  $H_3PO_4$  contiene



P soluble en agua, la acidulación parcial de la roca fosfórica con el  $H_3PO_4$  siempre da como resultado rocas fosfóricas parcialmente aciduladas que contienen más P total y P soluble en agua que la roca fosfórica no acidulada. La acidulación parcial de la roca fosfórica con el  $H_2SO_4$  siempre resulta en una reducción del P total debido a la formación de sulfato de calcio en el producto. Sin embargo, el contenido de P soluble en agua aumenta con el grado de acidulación. La pendiente de la curva del contenido de P soluble en agua es más pequeña inicialmente debido a la presencia de los minerales accesorios tales como los carbonatos libres, que son más solubles que la apatita y consumen preferencialmente el ácido añadido. Es posible preparar las rocas fosfóricas parcialmente aciduladas a partir de las rocas fosfóricas de baja reactividad. Sin embargo si esta baja reactividad es debido a los altos contenidos de óxidos de hierro y aluminio, la roca fosfórica no será adecuada para la acidulación parcial con el  $H_2SO_4$ . Esto es debido a que el P soluble en agua formado se convierte en P insoluble en agua durante la preparación de la roca fosfórica parcialmente acidulada (Hammond *et al.*, 1989).

Idealmente, la acidulación parcial de una roca fosfórica dada debe ser decidida después de un estudio de factibilidad que determine (i) el tipo de ácido tal como el ácido sulfúrico, el ácido fosfórico, una mezcla de ácidos o una mezcla de ácido sulfúrico y de sales amoniacaes, (ii) la cantidad y concentración de los ácidos, (iii) la temperatura y, (iv) el tipo de procedimiento de mezclado (añadir la roca fosfórica al volumen de ácido con un mezclado constante o pulverizar gotas finas del ácido sobre las partículas de la roca fosfórica cayendo como una cortina líquida). El objetivo es solubilizar la máxima cantidad de la roca fosfórica para un nivel dado de ácido adicionado. La experiencia ha mostrado que los niveles más eficientes de acidulación, que producen el máximo de P soluble por cantidad de ácido utilizada, varían del 30 al 60 por ciento. A estos niveles, los ácidos atacan la apatita pero tienen poco efecto sobre los minerales gangas duros tales como los silicatos.

Los principales compuestos fosfatados en las rocas fosfóricas parcialmente aciduladas son el fosfato monocálcico soluble en agua y la fracción de la roca fosfórica que no reacciona con el ácido, de poca solubilidad. La acidulación parcial y granulación de la roca fosfórica con el  $H_3PO_4$  dan productos que contienen fosfato monocálcico, un aglomerado soluble que se disuelve directamente cuando el fertilizante es aplicado al suelo, permitiendo así la disolución de la roca fosfórica residual. Por otro lado la acidulación parcial y la granulación de la roca fosfórica con el  $H_2SO_4$  pueden dar productos con  $CaSO_4$  cubriendo las partículas de la roca fosfórica. Esto puede impedir la disolución de la roca fosfórica residual (Rajan y Ghani, 1997). Es posible superar este problema controlando la temperatura de secado, tal como ha sido demostrado por los investigadores del IFDC preparando las rocas fosfóricas parcialmente aciduladas en un proceso de una sola etapa (Schultz, 1986).

#### ***El comportamiento agronómico de las rocas fosfóricas parcialmente aciduladas***

El comportamiento agronómico de las rocas fosfóricas parcialmente aciduladas varía con (i) las propiedades físicas y químicas de las rocas fosfóricas empleadas, (ii) el grado de acidulación, (iii) las propiedades químicas del suelo, especialmente el pH del suelo y la retención (absorción) de fósforo y, (iv) el sistema de cultivo. En general, los factores que aumentan la efectividad de las rocas fosfóricas parcialmente aciduladas son una alta reactividad y el tamaño fino de las partículas de la roca fosfórica, el pH ácido del suelo, una alta retención de P del suelo, un largo ciclo de crecimiento del cultivo y la rotación de cultivos. El producto es también probablemente más ventajoso que los fertilizantes fosfatados solubles en agua en las situaciones donde la lixiviación de los fosfatos puede ser un problema, como en los suelos arenosos (Bolland *et al.*, 1995). Incrementando el nivel de acidulación se incrementa el contenido de P soluble en agua y la efectividad agronómica de las rocas fosfóricas pero esto debe ser evaluado considerando el costo de producción del fertilizante. En todos los casos, el comportamiento agronómico de los

productos debe ser evaluado para determinar el nivel rentable de la acidulación para un grupo específico de condiciones (Owusu-Bennoah *et al.*, 2002; Casanova *et al.*, 2002a; Rodríguez y Herrera, 2002).

La revisión de las investigaciones sobre la efectividad agronómica de las rocas fosfóricas parcialmente aciduladas (Bolan *et al.*, 1990; Hammond *et al.*, 1986b; Rajan y Marwaha, 1993; Chien y Menon, 1995a; Chien, 2003b) llega a la conclusión general de que las rocas fosfóricas parcialmente aciduladas de 40–50 por ciento de acidulación con el  $\text{H}_2\text{SO}_4$  o las rocas fosfóricas parcialmente aciduladas de 20–30 por ciento de acidulación con el  $\text{H}_3\text{PO}_4$  son tan eficientes como el superfosfato completamente acidulado. En los suelos de alto pH (pH 6,5–8,0), las rocas fosfóricas parcialmente aciduladas pueden ser tan eficientes como el superfosfato, aunque con un grado más alto de acidulación con el  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , hasta el 50 por ciento de acidulación (cerca de 66 por ciento del P total en forma soluble en agua) (McLay *et al.*, 2000; Chien, 2003b).

Las posibles explicaciones para la alta eficiencia agronómica de las rocas fosfóricas parcialmente aciduladas son: (i) el efecto de iniciación temprana del desarrollo radicular debido al fosfato monocalcico de la roca fosfórica parcialmente acidulada y la subsiguiente mayor exploración del suelo enriquecido en P por las raíces y, (ii) la disolución del fosfato monocalcico para formar  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , que reacciona con la roca fosfórica residual (acidulación secundaria). Los estudios sobre crecimiento radicular han demostrado un aumento marcado en el desarrollo de la raíz en los suelos tratados con las rocas fosfóricas parcialmente aciduladas en comparación a los suelos tratados con las rocas fosfóricas (Rajan y Watkinson, 1992). Se ha encontrado bajo condiciones de invernadero y de campo que la roca fosfórica residual se disuelve más fácilmente en las rocas fosfóricas parcialmente aciduladas que en las rocas fosfóricas no aciduladas (Rajan y Watkinson, 1992; Rajan y Ghani, 1997; McLay *et al.*, 2000).

### *Producción de roca fosfórica parcialmente acidulada en una fábrica de superfosfato simple*

Las rocas fosfóricas parcialmente aciduladas han sido producidas en Nueva Zelanda en una fábrica de superfosfato simple mezclando una roca fosfórica reactiva con el superfosfato simple (relación 30:70 en peso) a la salida del reactor cuando el superfosfato estaba todavía húmedo. El producto fue comercializado bajo el nombre de *Longlife Super*. El grado de acidulación parcial fue dependiente de la relación ácido:roca fosfórica utilizada para producir el superfosfato simple y por consiguiente de la cantidad de ácido libre disponible para reaccionar con la roca fosfórica (Bolan *et al.*, 1987; Hedley *et al.*, 1988). El P soluble en agua fue aportado sobre todo por el superfosfato simple y en menor grado por la acidulación parcial de la roca fosfórica adicionada.

La eficiencia agronómica del *Longlife Super* aplicado a las pasturas permanentes fue determinada en seis ensayos de campo durante tres años (Ledgard *et al.*, 1992). Los fertilizantes contenían 35-50 por ciento del P total en forma soluble en agua y los valores de pH del suelo fueron de cerca de 5,7. Los resultados mostraron que la respuesta de las pasturas al *Longlife Super* fue generalmente menor que la del superfosfato. Estudios sistemáticos mostraron que el pobre comportamiento del *Longlife Super* fue debido al  $\text{CaSO}_4$  que cementaba las partículas de la roca fosfórica en los gránulos durante unas seis semanas, disminuyendo así su disolución.

## MÉTODOS FÍSICOS

### Compactación de la roca fosfórica con fertilizantes fosfatados solubles en agua

Fertilizantes de composición química similar a las rocas fosfóricas parcialmente aciduladas pueden ser preparados indirectamente mediante la compactación de la roca fosfórica seca con los fertilizantes fosfatados solubles en agua tales como el

superfosfato simple o el superfosfato triple (Chien *et al.*, 1987a; Chien y Menon, 1995a; Menon y Chien, 1996). El contenido de P soluble en agua de los productos dependerá de la relación entre la roca fosfórica y el fertilizante fosfatado soluble en el agua utilizada. La tecnología de la compactación ofrece la ventaja de emplear las rocas fosfóricas que no son adecuadas para la acidulación parcial directa con el  $H_2SO_4$  debido a sus altos contenidos de sesquióxidos de Fe y Al. Existe evidencia de que se incrementa la efectividad de las rocas fosfóricas, aún aquellas de baja reactividad, después de compactarlas con los fertilizantes fosfatados solubles en agua (Chien *et al.*, 1987a; Kpombrekou *et al.*, 1991). Bajo estas condiciones, la compactación de la roca fosfórica con los fertilizantes fosfatados solubles en agua en una relación de alrededor 50:50 puede hacer atractivo, agronómica y económicamente, el empleo de las rocas fosfóricas locales en los países en vías de desarrollo. Sin embargo, la eficiencia agronómica de los fertilizantes compactados con relación a los fertilizantes fosfatados solubles en agua dependerá de un cierto número de factores, similar a la de las rocas fosfóricas parcialmente aciduladas.

### Mezclas en seco de la roca fosfórica con fertilizantes fosfatados solubles en agua

Está demostrado en ensayos de campo que la aplicación de la roca fosfórica mezclada en seco con los fertilizantes fosfatados solubles en agua puede aumentar la efectividad de la roca fosfórica aplicada. Las investigaciones realizadas en India con un suelo calcáreo indicaron que la aplicación de una mezcla 1:1 de la roca fosfórica de Mussoorie y de superfosfato simple en una dosis única podía ser tan eficaz como el superfosfato simple (Siddique *et al.*, 1986). En otro estudio de campo, la roca fosfórica de Mussoorie y el superfosfato simple fueron mezclados en una relación de P de 2,2:1 utilizando tres dosis de aplicación (Singaram *et al.*, 1995). Los resultados mostraron que la mezcla roca fosfórica-superfosfato simple tuvo la tendencia a ser tan efectiva como el superfosfato simple en un suelo alcalino (pH 8,2). Además, el producto fue económicamente igual al superfosfato simple, considerando una secuencia de tres cultivos. Se calculó que la disolución de la roca fosfórica se incrementó en 55 por ciento cuando fue aplicada en mezcla con el superfosfato en comparación a la disolución de la roca fosfórica aplicada sola.

En un estudio en invernadero, Chien *et al.* (1996) hicieron estimados cuantitativos de la influencia de los fertilizantes fosfatados solubles en agua (en forma de superfosfato triple) sobre el aumento de la efectividad agronómica de la roca fosfórica de Florida central de reactividad media, utilizando fertilizantes marcados con fósforo radioactivo ( $^{32}P$ ). La roca fosfórica y el superfosfato triple fueron aplicados por separado al suelo en una relación de P de 1:1. En base a la absorción de fósforo por las plantas, el estudio mostró que la eficiencia de la roca fosfórica en mezcla con el superfosfato triple aumentó en 165 por ciento para el maíz y 72 por ciento para el caupí. En otro estudio en invernadero, Habib *et al.* (1999) encontraron que la mezcla física de roca fosfórica y superfosfato triple fue tan efectiva como el superfosfato triple para la colza cultivada en un suelo alcalino con la adición de cal. Zapata y Zaharah (2002) también encontraron un efecto mejorador sobre la eficiencia agronómica de la roca fosfórica de Florida y de los lodos residuales cuando estos fueron aplicados en mezcla con el superfosfato triple.

La mayor eficiencia de la roca fosfórica cuando se aplica en mezcla seca puede ser atribuida al efecto de arranque temprano del fósforo soluble sobre el desarrollo radicular y, por lo tanto, un mayor volumen de explotación por las raíces de la roca fosfórica adicionada. Considerando los requerimientos mínimos de procesamiento y el mejoramiento obtenido sobre la efectividad de la roca fosfórica, los resultados arriba indicados tienen una gran importancia económica. Es necesario realizar más investigaciones bajo condiciones de campo para evaluar la utilidad de este proceso.

### Mezclas de roca fosfórica y azufre elemental

Numerosos estudios han mostrado que la efectividad agronómica de las rocas fosfóricas puede ser mejorada cuando estas son aplicadas en mezcla o granuladas con azufre (S). En algunos casos, los productos fueron inoculados con las bacterias oxidantes del azufre *Thiobacillus* spp. El producto fue llamado «*biosuper*» (Swaby, 1975). Kucey *et al.* (1989) revisaron la función de los microorganismos sobre el aumento del P disponible para las plantas.

El principio básico del uso de las mezclas de la roca fosfórica y del azufre elemental es que la población nativa o inoculada de las bacterias del suelo oxide el S a  $H_2SO_4$  cuando el producto es aplicado al suelo. Este ácido reacciona a su vez con las partículas de la roca fosfórica, las que se hallan cercanas al S y forma los fosfatos monocálcico y dicálcico. La disolución de las rocas fosfóricas en el suelo es ayudada por la acidulación localizada, además de aquella causada por la acidez ambiental del suelo. Las más importantes especies de las bacterias oxidantes del azufre son *Thiobacillus thiooxidans* y *T. thioparus*. La inoculación de los suelos que poseen abundante *Thiobacillus* spp. puede ser no esencial (Rajan, 1982a) pero se prefiere la inoculación para obtener una rápida multiplicación de las bacterias y la disolución de la roca fosfórica después de su aplicación al suelo.

Las mezclas de rocas fosfóricas y azufre son atractivas debido a que: (i) su producción no requiere una gran inversión de capital, (ii) permiten combinaciones flexibles de la relación rocas fosfóricas-azufre, (iii) permiten utilizar las rocas fosfóricas de baja calidad que pueden no ser adecuadas para producir fertilizantes solubles y, (iv) se comportan como fertilizantes de liberación controlada de P y de S. Como aspecto negativo para una rápida oxidación del azufre este debe estar presente como partículas finas (95 por ciento menores de 0,15 mm), ya sea que es molido directamente con la roca fosfórica o bien es molido por separado y luego mezclado. La molienda del azufre sin mezclar con la roca fosfórica o en estado seco, sin adición de humedad, presenta riesgos de incendio y, por lo tanto, este método no se recomienda. En Nueva Zelandia una planta piloto ha producido mezclas de rocas fosfóricas y azufre conteniendo bacterias *Thiobacillus* spp. (*EnviroPhostm<sup>TM</sup>*) empleando una técnica rentable.

Los factores que influyen la efectividad de las mezclas roca fosfórica-azufre son: (i) la reactividad de la roca fosfórica, (ii) la relación roca fosfórica:azufre, (iii) el tipo de cultivos y, (iv) las condiciones ambientales del suelo. Se espera que la efectividad agronómica de las rocas fosfóricas aplicadas como roca fosfórica-azufre aumentará con la reactividad de las rocas fosfóricas o con la finura de las partículas de la roca fosfórica (Rajan, 1982b; Loganathan *et al.*, 1994). La investigación muestra que una roca fosfórica-azufre preparada con la roca fosfórica reactiva de Carolina del Norte finamente molida en una relación roca fosfórica:azufre de 5:1 fue tan eficiente como el superfosfato simple mientras que aquella preparada a partir de la roca fosfórica no reactiva de Florida fue inferior. Sin embargo, hubo un incremento en la eficiencia agronómica de ambas rocas fosfóricas cuando fueron aplicadas como roca fosfórica-azufre, con valores variando entre 18 a 30 por ciento para la roca fosfórica de Carolina del Norte y 50 a 70 por ciento para la roca fosfórica de Florida, dependiendo de la dosis de aplicación (Rajan, 1982b).

Como el  $H_2SO_4$  producido por la oxidación del S afecta la disolución de la roca fosfórica de la mezcla roca fosfórica-azufre, es lógico concluir que el aumento del contenido de S en la roca fosfórica-azufre aumentará su eficiencia agronómica. Por otro lado se necesita un enfoque balanceado ya que un mayor enriquecimiento del producto con S resultará en un mayor costo del producto. Los resultados de estudios iniciales muestran que las mezclas roca fosfórica-azufre pueden ser tan efectivas como el superfosfato simple cuando las relaciones roca fosfórica:azufre son entre 1:1 y 5:1 (Kittams y Attoe, 1965; Attoe y Olson, 1966; Swaby, 1975). La relación 5:1 es similar a la proporción en que la roca fosfórica y el azufre en la forma de  $H_2SO_4$  son empleados



para producir el superfosfato simple. Sin embargo, en la mayoría de los casos han sido utilizadas las rocas fosfóricas no reactivas tales como la roca fosfórica de Florida (Estados Unidos de América) y la roca fosfórica de Queensland (Australia). Cuando se emplearon las rocas fosfóricas reactivas finamente molidas, esta relación puede ser aumentada a 7:1 sin perder efectividad agronómica (Rajan, 1983). En los cultivos a largo plazo tales como las pasturas permanentes, las mezclas roca fosfórica-azufre preparadas en una relación de 14:1 pueden ser agronómicamente tan efectivas como el superfosfato (Rajan, 2002). Por otro lado para los cultivos de ciclo corto que requieren una alta tasa de suministro de P, se necesitarán mezclas roca fosfórica-azufre en una relación estrecha preparadas con las rocas fosfóricas reactivas. Con respecto a la influencia del medio ambiente del suelo, la efectividad agronómica de las mezclas será mayor en los sitios que favorecen la disolución de la roca fosfórica. Bajo tales condiciones, las mezclas roca fosfórica-azufre preparadas con las rocas fosfóricas menos reactivas o con amplias relaciones roca fosfórica:azufre si las rocas fosfóricas son altamente reactivas, pueden ser utilizadas tan eficientemente como los fertilizantes fosfatados solubles.

La efectividad del S será mayor si las partículas de S están en contacto íntimo con las rocas fosfóricas ya que esto facilitará la reacción máxima del  $H_2SO_4$  producido sobre la roca fosfórica. Por esta razón, se han obtenido mezclas roca fosfórica-azufre por cogranulación de la roca fosfórica con el S elemental (Swaby, 1975; Rajan, 1982b). Como aspecto negativo, la granulación restringe el área de superficie para que el suelo ácido reaccione con la roca fosfórica. Por esto, se prefieren los gránulos de menos de 2 mm. Se ha encontrado que las mezclas físicas en húmedo conteniendo *Thiobacillus* spp. son tan efectivas como el superfosfato simple para la producción de las pasturas (Rajan, 2002).

## Capítulo 10

# Factores económicos que influyen la adopción y la utilización de las rocas fosfóricas

El aumento de la presión demográfica, la reducción del período de barbecho, la deforestación y las prácticas agrícolas inadecuadas han conducido a una extensiva degradación de los suelos en muchas partes del mundo en desarrollo. Un indicador importante de estos daños ambientales es la restitución inadecuada de nutrientes y de materia orgánica del suelo. En particular, la deficiencia de fósforo resulta crítica en muchos suelos. Además, debido a los efectos complementarios en la absorción de los nutrientes de las plantas, esta deficiencia amenaza disminuir la viabilidad de la aplicación de otros nutrientes. Con la finalidad de preservar la sostenibilidad de la agricultura y proteger los medios de vida de los grandes sectores de la población rural existe una necesidad urgente de restablecer la fertilidad del suelo y así mantener y mejorar los niveles actuales de productividad y los beneficios de las explotaciones agrícolas (Heerink *et al.*, 2001).

La intensificación de la agricultura sostenible y el cambio a cultivos de mayor rentabilidad requieren una aplicación cuidadosa de los insumos externos tales como los fertilizantes inorgánicos. Un cierto número de factores han limitado el uso de los fertilizantes, especialmente en el África subsahariana y en los países de Asia de recursos limitados. Los factores más importantes son la escasez de recursos financieros así como la falta de capacidad para asumir riesgos por parte de los agricultores, los sistemas de distribución de fertilizantes (y de los excedentes de la producción para comercialización) son costosos y de mala calidad, el desconocimiento del potencial para utilizar la roca fosfórica local y la falta de técnicas no industriales destinadas a aumentar la solubilidad de la roca fosfórica (Appleton, 2001).

En muchos países la escasez de divisas ha limitado el uso de los fertilizantes al restringir las importaciones. Además, la oferta doméstica ha sido afectada por intervenciones y regulaciones de los gobiernos que han dificultado la aparición de un mercado privado de los fertilizantes. Como resultado, estos países son excesivamente dependientes de la ayuda que aportan los fertilizantes. Como la mayoría de los donantes bilaterales no están dispuestos a asumir compromisos a largo plazo en materia de ayuda con fertilizantes, la dependencia de la ayuda presenta un alto grado de incertidumbre e impide el desarrollo de sistemas eficientes de oferta de los insumos y de las redes de comercialización. Esto también desalienta el empleo de los fertilizantes porque los agricultores no se sienten seguros para adoptar prácticas de cultivo que requieren su uso intensivo cuando el acceso a los mismos no está asegurado. Otra desventaja de esta ayuda aportando fertilizantes es que los fertilizantes a bajo costo y subsidiados reducen los incentivos para desarrollar los recursos domésticos, especialmente la roca fosfórica para aplicación directa.

Después de la ejecución de los programas de ajuste estructural, el precio real del fertilizante importado aumenta sustancialmente creando una limitación adicional para su utilización. Sin embargo, al mismo tiempo, un fertilizante importado más caro resulta un incentivo para desarrollar los productos locales de reemplazo. Debido a la fatiga generalizada de los donantes por los proyectos y por la ayuda en productos, la recuperación de la fertilidad del suelo mediante un programa de ayuda está siendo considerada de manera creciente como una alternativa más sostenible y rentable que los

programas de ayuda en alimentos. Por medio de la obtención de mayores rendimientos, el mejoramiento de la fertilidad del suelo constituye una contribución a largo plazo para aumentar la seguridad alimentaria.

Los gastos de aplicación de fuentes de fósforo, especialmente aquellas con un contenido significativo de P menos soluble tales como las rocas fosfóricas, pueden ser considerados como una restauración del recurso natural de base debido a que esto aumenta y mantiene el recurso del capital natural incorporado en los recursos del suelo. En este sentido, la roca fosfórica puede ser considerada como una enmienda para mejorar el suelo, haciendo más eficiente el uso de los insumos comunes tales como los fertilizantes para la nutrición de los cultivos, el agua y la mano de obra. Los agricultores y la sociedad se beneficiarán con el aumento de la producción agrícola y la reducción del empobrecimiento de nutrientes para la producción agrícola (Gerner y Baanante, 1995). Definida de esta manera, la aplicación de la roca fosfórica puede ser considerada como una inversión de capital.

La distinción entre la aplicación de la roca fosfórica como una enmienda del suelo y como fertilizante para los cultivos es importante. Los fertilizantes fosfatados pueden ser producidos por un proceso relativamente simple de beneficio de la roca fosfórica y un procesamiento industrial posterior. La roca fosfórica y los fertilizantes fosfatados solubles en agua tales como el superfosfato simple, el superfosfato triple y el fosfato diamónico son insumos fosfóricos que compiten entre sí y que los agricultores seleccionarán en base al precio, a la disponibilidad, a la calidad y a otras características. Una pregunta pertinente es ¿bajo qué circunstancias la roca fosfórica local presenta un margen competitivo sobre los fertilizantes industriales? Además, los agricultores pueden combinar la roca fosfórica como enmienda de base para el suelo con las aplicaciones regulares de los fertilizantes industriales.

La roca fosfórica como una inversión de capital da lugar a diversas cuestiones respecto a la financiación de dicha enmienda del suelo. En primer lugar, la inversión inicial es grande ya que al comienzo requiere una aplicación de grandes dosis de roca que produce ganancias a largo plazo. Los agricultores de escasos recursos no cuentan con la financiación adecuada para invertir ni los bancos comerciales les desean otorgar préstamos debido al alto riesgo y la mala garantía. En segundo lugar, la roca fosfórica reconstruye la fertilidad natural de los suelos empobrecidos. Esta inversión en los suelos es comparable a proyectos de recuperación o de mejoramiento de las tierras. Todos ellos requieren inversiones públicas que mejoran la rentabilidad privada a largo plazo y cambian las ventajas comparativas en la producción.

### **ADOPCIÓN Y USO POSIBLE DE ROCAS FOSFÓRICAS POR LOS USUARIOS**

Los estudios de caso sobre la aplicación de la roca fosfórica en Burkina Faso, Madagascar, Malí y Zimbabwe (World Bank, 1997; NEI, 1998; Kuyvenhoven *et al.*, 1998b; Henao y Baanante, 1999) muestran que las tasas de retorno a nivel de explotación agrícola pueden ser altamente atractivas para diversos cultivos, mas aún cuando se consideran los impactos sobre el medio ambiente y para la sociedad en general. A pesar de estos resultados, la adopción permanece limitada en la práctica. En contraste con las rocas fosfóricas locales, los fertilizantes fosfatados derivados, generalmente importados, presentan a menudo los mejores resultados (Appleton, 2001). Sin embargo, tampoco se observa un uso generalizado de tales fuentes importadas, excepto para un cierto número de cultivos comerciales. Un análisis costo-beneficio de la aplicación de los fertilizantes toma en cuenta solamente una parte del comportamiento de adopción de los agricultores. Es necesario un análisis más completo de las estrategias de la administración familiar y de la explotación agrícola para comprender los factores que limitan una adopción más importante.

En general, las administraciones familiares de las explotaciones agrícolas adoptan aquellas prácticas, tecnologías, iniciativas y actividades (agrícolas y no agrícolas) que

mejor se acomodan a sus objetivos considerando sus recursos propios, sus limitaciones y el ambiente socioeconómico en el que operan. Esto implica que las intervenciones particulares tales como la aplicación de la roca fosfórica no deben ser analizadas de manera aislada sino en conjunto con otras opciones competitivas (en términos de tiempo, de mano de obra, de financiamiento, de ganancias y otras) para la finca familiar o la sociedad de la explotación agrícola. En este sentido, la rentabilidad es solamente una condición necesaria para la adopción.

Los factores principales que se han encontrado como determinantes para la adopción, en particular de la roca fosfórica, son los títulos y derechos de propiedad (o de posesión continua) para asegurar el acceso a los flujos de las rentas, el tamaño de la finca, el uso de la tierra bajo cultivo y la proporción de las tierras de reserva (indicadores de la presión sobre los recursos), el acceso al crédito, las rentas fuera de la finca disponibles para una inversión en la finca, los sistemas de producción de la finca, los precios y el acceso al abastecimiento oportuno y adecuado de los fertilizantes y otros insumos diversos y el conocimiento y el acceso a las informaciones sobre el uso de los fertilizantes y las tecnologías de la producción agrícola en general. Estos factores influyen el período de duración (e implícitamente la tasa de interés) para las decisiones de inversión y el grado de rechazo de las administraciones familiares de las fincas con respecto a los riesgos involucrados.

Los agricultores raramente son propietarios de la tierra que trabajan. Por lo tanto, difícilmente desean invertir en el mejoramiento de las tierras a largo plazo. Los agricultores que tienen los derechos de acceso a la tierra bien establecidos obtendrán todos los ingresos adicionales a corto y a largo plazo asociados con la aplicación de la roca fosfórica. Los agricultores que tienen el usufructo de la tierra a largo plazo a través de arreglos de arriendo de la tierra, tales como el cultivo compartido, compartirán estos beneficios con los dueños de la tierra, que pueden ser propietarios privados o toda la comunidad. Los agricultores arrendatarios que comparten los cultivos sobre la tierra durante solamente un ciclo de cultivo no obtendrán ninguno de los beneficios a largo plazo sino solamente una parte de los beneficios a corto plazo (Gerner y Baanante, 1995). El sistema de propiedad/derechos de la tierra en muchos de los países en desarrollo puede ser descrito como un sistema tradicional de tipo comunal de tenencia y uso de la tierra con las siguientes características: (i) poca concentración de la propiedad (derechos soberanos en posesión de la comunidad), (ii) cultivo descentralizado (derecho de usufructo para los miembros del grupo) y, (iii) producción para la subsistencia. De esta manera, la inversión en roca fosfórica será más probablemente realizada como una acción de inversión pública. Por lo tanto, toda la comunidad deberá financiar esta inversión y no los agricultores individualmente.

Una inversión de capital en el suelo mediante la aplicación de la roca fosfórica tiene un costo inicial alto y produce retornos de inversión sobre un período largo. El acceso al crédito está generalmente restringido. Sin embargo las rentas fuera de la finca pueden ayudar a superar una limitación de capital o a financiar la compra de una nueva tecnología del tipo inversión fija (Feder *et al.*, 1985). El tamaño de la finca puede tener diferentes efectos sobre la tasa de adopción de las nuevas tecnologías, tales como el uso de la roca fosfórica, dependiendo de las características de la tecnología y del marco institucional. La relación entre el tamaño de la finca y la adopción depende de factores tales como los costos fijos de adopción, las preferencias de riesgo, el capital humano, las limitaciones de crédito, los requerimientos de mano de obra y los arreglos de tenencia de la tierra. Una limitación frecuentemente mencionada para la adopción de una tecnología por pequeñas fincas está relacionada con los costos fijos de la ejecución. En el caso de la aplicación de la roca fosfórica, estos costos son de gran importancia. Los costos fijos elevados reducen la tendencia a adoptar la tecnología y disminuyen la tasa de adopción en las fincas más pequeñas (Feder *et al.*, 1985).

La mayoría de los agricultores que desean invertir en roca fosfórica tienen un sistema de manejo relativamente intensivo de la finca. En tales sistemas de cultivo, la tracción animal está disponible y se aplica estiércol. En el caso de una aplicación de la roca fosfórica con el objetivo de restaurar la fertilidad a largo plazo, la roca debe estar disponible en el momento oportuno para los agricultores debido a que una aplicación después de la época óptima reduce la posibilidad de obtener los incrementos inmediatos de rendimiento. La disponibilidad de la mano de obra es otra variable que afecta la decisión de los agricultores para adoptar nuevas prácticas o insumos agrícolas. Este factor es particularmente importante en África (Helleiner, 1975). Las tecnologías nuevas tales como la aplicación de la roca fosfórica aumentan la demanda estacional de la mano de obra. En ese caso la adopción es menos atractiva para las administraciones familiares de las fincas con limitaciones de mano de obra familiar o aquellas que operan en áreas con menor acceso a los mercados de mano de obra. La escasez de mano de obra resulta principalmente de la migración de los trabajadores, de la carga de trabajo excesiva sobre las mujeres y de la falta de tracción animal. Las consecuencias son el retraso en la labranza, las siembras tardías, los deshierbes retrasados, las cosechas tardías y los rendimientos bajos.

Una limitación relacionada específicamente al uso de los fertilizantes fosfatados es el desfase cronológico entre la aplicación del producto y los efectos visibles (respuesta) de los cultivos. Según la reactividad de la roca fosfórica, los efectos observables pueden ocurrir durante el ciclo de cultivo de la aplicación o tres o más años después de la aplicación. La falta de educación y de los servicios de extensión pueden ser otra limitación para el uso de la roca fosfórica. La incapacidad para leer y comprender las informaciones en el embalaje y las instrucciones sobre la forma de utilización de los fertilizantes restringen la eficiencia de utilizar la información escrita como medio para diseminar los conocimientos sobre los fertilizantes. La experiencia de las investigaciones de campo ha demostrado que por lo menos existe una limitación en el uso de la roca fosfórica. En África occidental los agricultores se quejaban de que esparciendo la roca fosfórica finamente molida, el viento llevaba el producto a sus ojos y les causaba una sensación de ardor.

Los factores mencionados corresponden con aquellos mostrados por Henao y Baanante (1999) en su estudio de caso de Malí quienes remarcaron «la magnitud e importancia relativa de los sobrantes (excedentes de la producción) de las fincas rurales familiares para la comercialización, en particular los rendimientos y los precios de las producciones vegetal y animal. Un desarrollo sostenible de los excedentes comercializables de los agricultores debe estar asociado al aumento en la adopción de la roca fosfórica y de otros insumos externos. La falta de excedentes para comercialización asociada a la agricultura de subsistencia es una seria limitación para la adopción de la roca fosfórica y de otros insumos externos. Es importante remarcar que el crecimiento sustentable de los excedentes de los agricultores para la comercialización también depende de la existencia de salidas sobre el mercado y de la demanda por sus productos que puedan asegurar precios estables y adecuados» (Henao y Baanante, 1999). Appleton (2001) informó sobre conclusiones similares respecto al comportamiento de los agricultores.

Enyong *et al.* (1999) analizaron las percepciones y las actitudes de los agricultores sobre las tecnologías para el mejoramiento de la fertilidad del suelo (SFET: *Soil Fertility Enhancing Technologies*) introducidas en el África occidental. Concluyeron que los agricultores están bien informados y practican diversas tecnologías SFET, que incluyen la aplicación de la roca fosfórica, del estiércol y de los residuos de cosecha de la granja y de los fertilizantes químicos y la rotación de cultivos para combatir la disminución de la fertilidad del suelo. Un cierto número de factores influyen sus actitudes y las justificaciones para tomar las decisiones de adopción. Estos factores incluyen las políticas de uso de la tierra, los recursos de mano de obra, las preocupaciones por la seguridad alimentaria, la percepción de rentabilidad, la contribución a la sostenibilidad

y el acceso a la información. Enyong *et al.* (1999) observaron que algunos de estos factores están fuera del control de los agricultores y requieren un esfuerzo amplio e integrado de los servicios de investigación y extensión y del gobierno para promover el uso de las tecnologías para el mejoramiento de la fertilidad del suelo (incluyendo la roca fosfórica) en la región.

### **COSTOS DE PRODUCCIÓN, TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN**

Diversos países en el mundo en vías de desarrollo poseen reservas de roca fosfórica pero pocos de estos recursos son explotados comercialmente en escala importante. Appleton (2001) ha realizado una revisión completa de las reservas y de las condiciones de producción y de infraestructura en el África subsahariana, pero advierte que los datos sobre los costos de producción, transporte y distribución varían ampliamente según las características del sitio y la infraestructura disponible. Cada caso es probablemente diferente, lo que impide extraer conclusiones generales sobre la factibilidad de la explotación minera y de las plantas de procesamiento si no se dispone de una evaluación técnica, económica e institucional/organizacional detallada. Una vez que tales estudios de prefactibilidad han justificado investigaciones complementarias puede ser iniciado un estudio completo de factibilidad.

En vista de las circunstancias extremadamente variables de extracción, producción y distribución, esta primera sección se limita a una breve revisión. Las secciones siguientes proporcionan algunas informaciones generales sobre la comercialización de la roca fosfórica en varias partes del mundo mientras que las secciones finales presentan un estudio de caso sobre la producción en gran escala de la roca fosfórica en Venezuela para ilustrar algunas características de la cadena de producción. El resto de esta sección trata de los aspectos de producción de la roca fosfórica en el África subsahariana.

Senegal y Togo son países productores de roca fosfórica pero el mayor volumen de sus fosfatos está destinado a la producción de fertilizantes. Burkina Faso, Malí y Níger también poseen roca fosfórica pero su explotación se realiza en pequeña escala. La calidad es insuficiente para su uso en la industria química y además los costos de transporte son prohibitivos. Se han realizado diversos intentos para promover una utilización de la roca fosfórica en gran escala pero con éxito limitado; una de las razones principales es el precio relativamente alto del producto.

El equipo para la molienda es costoso y las inversiones son solamente rentables para grandes cantidades. El equipo es técnicamente simple, los costos operacionales por tonelada son relativamente bajos y el aumento de las cantidades procesadas permite realizar importantes economías de escala. Mientras que la planta existente en Burkina Faso produce unas 2 000 toneladas de roca fosfórica por año a un precio de salida de fábrica de cerca \$ EE.UU. 97 por tonelada, la inversión en una nueva fábrica para aumentar la producción a 30 000 toneladas por año dará como resultado un precio menor de \$ EE.UU. 24,25 por tonelada, comparable con los precios de salida de fábrica de las rocas fosfóricas de Togo y de Senegal (NEI, 1998).

La roca fosfórica es un producto voluminoso. Este volumen, combinado con las largas distancias entre las minas y los campos agrícolas y las condiciones frecuentemente malas de los caminos conforman altos costos unitarios de transporte. Cuando los costos de producción de la roca fosfórica son considerablemente más bajos que los de los fertilizantes químicos, esta ventaja es parcialmente compensada por los costos más altos de transporte. Esto es debido al más bajo contenido efectivo de P de la roca fosfórica en comparación con los fertilizantes fosfatados solubles en agua y por lo tanto las mayores cantidades requeridas para obtener los mismos resultados. Lo mismo ocurre con las rocas fosfóricas de otro origen. La roca fosfórica producida localmente cuesta menos que la roca fosfórica importada pero la ganancia disminuye rápidamente con la distancia geográfica. En consecuencia, la aplicación de la roca fosfórica quedará limitada geográficamente pero podría ser interesante dentro de estas áreas.



A diferencia de los fosfatos químicos, la roca fosfórica no es un producto homogéneo. En primer lugar, el contenido de  $P_2O_5$  es diferente. Las rocas fosfóricas de Senegal y Togo tienen un contenido de 38 por ciento, la roca fosfórica de Tilemsi (Malí) tiene un contenido de 32 por ciento y la roca fosfórica de Burkina Faso cerca de 27 por ciento. Otra diferencia es la solubilidad. Mientras que el superfosfato triple es soluble en agua, la roca fosfórica es insoluble. En particular, la reactividad de la roca fosfórica de Burkina Faso es relativamente baja. Consecuentemente, se necesita una cantidad mayor de roca fosfórica para obtener el mismo efecto fertilizante que una cantidad comparable de superfosfato triple. En promedio, es necesario aplicar tres a cuatro veces la cantidad de la roca fosfórica de Senegal y seis veces la cantidad de la roca fosfórica de Burkina Faso, en comparación con el superfosfato triple, a fin de obtener el mismo efecto fertilizante, por lo menos a corto plazo. Esto es compensado parcialmente por el hecho que los productos menos solubles tienen un efecto más duradero, de hasta 7–10 años, si bien no hay datos exactos. Además, tal duración excede el período previsto por la mayoría de los pequeños agricultores del África occidental.

Las diferencias en la calidad de la roca fosfórica restringen el área geográfica en el que una roca fosfórica de cierta calidad puede ser aplicada de manera rentable. En Burkina Faso, los precios unitarios de la roca fosfórica de Burkina Faso son inferiores a aquellos de la roca fosfórica importada. Sin embargo, la importación de la roca fosfórica de Senegal podría ser más interesante en el sudoeste del país si se tienen en cuenta las diferencias en calidad. No obstante, la producción local de roca fosfórica es promisoría para las regiones centrales donde las necesidades de restauración y conservación de la fertilidad del suelo son más importantes.

Appleton (2001) resume estas consideraciones: «La roca fosfórica es un producto de bajo valor y de gran volumen con costos de transporte elevados, de tal manera que el potencial económico de un depósito será determinado en gran parte por su localización en relación a los mercados doméstico e internacional. La mayoría de los depósitos comerciales de roca fosfórica están localizados cerca a la costa y en los países con instalaciones portuarias eficientes en aguas profundas. Si la infraestructura de transporte de un país está mal desarrollada y especialmente si no hay ferrocarril y canalizaciones/ductos para transportar la roca fosfórica, entonces será más rentable importar los fertilizantes de alto grado tales como el fosfato diamónico, más bien que desarrollar los recursos locales. Los recursos de rocas fosfóricas situados en localidades geográficamente remotas y/o desfavorables debido a las grandes distancias de los mercados o de las instalaciones eficientes de transporte es poco probable que sean económicos para ser utilizados en los mercados internacionales, mientras que su uso local o quizás regional puede ser una opción económicamente viable. Por el contrario, para las zonas agrícolas localizadas a gran distancia de la costa, especialmente en los países mediterráneos, será más rentable desarrollar los recursos locales de rocas fosfóricas para uso como fertilizante de aplicación directa más bien que importar los fertilizantes manufacturados. Los costos de transporte elevados pueden ser de menor importancia si la roca fosfórica puede ser convertida en un producto fertilizante manufacturado de alto valor, si bien la cantidad y calidad de los recursos de la roca fosfórica pueden impedir esto».

### **CONSIDERACIONES ECONÓMICAS Y POLÍTICAS PARA APOYAR LA ADOPCIÓN DE LA ROCA FOSFÓRICA**

A nivel macroeconómico, los efectos son generalmente medidos a través de los cambios en las ganancias de los sectores privado o público, es decir los excedentes para el consumidor y el productor y los efectos sobre el presupuesto del gobierno. Además de estas metas relacionadas con la eficiencia, generalmente se introducen criterios de redistribución y de medio ambiente. La aplicación de la roca fosfórica genera empleos adicionales tanto en la extracción minera y procesamiento como en el sector de la

infraestructura. Por lo tanto, puede aliviar la emigración. Estos sectores necesitan inversiones complementarias por parte del gobierno. Para muchos gobiernos, el impacto global sobre las finanzas públicas (además de los efectos directos del proyecto), el empleo, la migración y la balanza de pagos son una consideración importante.

La intensificación, las nuevas variedades, los mejores fertilizantes y los costos de transporte reducidos mueven la curva de la oferta agrícola hacia la derecha ocasionando incrementos del rendimiento y/o reducciones de los precios. Las ganancias difieren marcadamente cuando los bienes son productos no comerciales (sorgo, mijo) en contraste a los productos comerciales (algodón) o un producto sujeto a apoyo de precio por el gobierno. En el caso de un producto no comercial, el aumento de la producción resulta en una disminución de precio y los consumidores son los beneficiarios principales. Con un producto comercial, es posible que no ocurra ningún cambio de precio. Por lo tanto, los agricultores ganan teniendo como resultado un aumento de las rentas de la tierra mientras que la ganancia para los consumidores es pequeña o despreciable. En la ausencia de un análisis más completo, los siguientes efectos de la aplicación de la roca fosfórica presentan un interés más amplio.

En primer lugar, en la medida que la inversión en roca fosfórica afecta la producción de los cultivos alimenticios es susceptible de aumentar la seguridad alimentaria en general. Con los servicios de apoyo en el lugar, los rendimientos promedio por hectárea más elevados aumentarán la disponibilidad total de alimentos haciendo disminuir los precios locales y suponiendo una economía cerrada. Tal desarrollo aliviará por lo menos en parte el problema de acceso a los alimentos para los habitantes de menores recursos de las ciudades. En el caso de un año con precipitación más baja que el promedio, la influencia de la roca fosfórica sobre la producción será todavía sentida y el nivel de producción más bajo es probable que supere la de un año normal sin la aplicación de la roca fosfórica. En ese caso, el uso sostenido de la roca fosfórica puede reducir las fluctuaciones de rendimiento y estabilizar los precios. En la medida que la roca fosfórica sustituye las importaciones del superfosfato triple, tiene un efecto positivo sobre la balanza de pagos. Como el uso de la roca fosfórica también aumenta la producción agrícola, las importaciones de alimentos no tendrán necesidad de ser tan altas.

En segundo lugar, la aplicación de la roca fosfórica es una de las diversas formas disponibles para mejorar la fertilidad del suelo. La rentabilidad determinará cual método será preferido en una localidad dada. La discusión para determinar cual es la mejor manera de mejorar la fertilidad del suelo no debe distraer la atención acerca de su función como un instrumento poderoso para iniciar una intensificación sostenible, mejorar la productividad y aumentar los beneficios. Como ha mostrado Sissoko (1998), entre 12 medios utilizados para estimular una agricultura sostenible en Malí, el mejoramiento de las tierras aparece como uno de las más eficientes. Otros medios son un apoyo a los precios de los productos, los costos más bajos de las transacciones y los subsidios a los fertilizantes.

En tercer lugar, un análisis más extensivo de las políticas para promover la intensificación sostenible en Malí (Kuyvenhoven *et al.*, 1998c) muestra que al disponer de condiciones más sostenibles de la producción a través de la investigación y la extensión, mejora la eficiencia de los recursos. Sin embargo, sin incentivos especiales para la adopción, los costos de ajuste pueden muy bien exceder los beneficios marginales. El impacto de estas políticas de incentivos difiere entre los tipos de explotación agrícola. Los subsidios a los fertilizantes favorecen tecnologías menos empobrecedoras del suelo en los cultivos comerciales (algodón), pero a expensas de las actividades más empobrecedoras del suelo con los cereales. En este sentido, los subsidios a los fertilizantes son ineficientes en términos de uso de los recursos y reducen los excedentes locales de alimentos. Como resultado, los precios de los productos alimenticios aumentarán y los agricultores serán estimulados a utilizar

de nuevo métodos menos empobrecedores del suelo. Sin embargo, la seguridad alimentaria de los compradores obligatorios de los productos alimenticios (familias urbanas) disminuirá debido a los precios más altos ocasionando un dilema de políticas. Tal como lo ilustran los estudios de caso descritos más adelante, los beneficios de la aplicación de la roca fosfórica sobre el medio ambiente pueden ser considerables justificando alguna forma de apoyo público o de la parte de los donantes para promover más altas y más rápidas tasas de adopción donde esto sea deseable. Las consideraciones económicas arriba indicadas permiten la identificación de las medidas de política que pueden mejorar la adopción de la roca fosfórica por los agricultores. Se deberá hacer una distinción entre las políticas de precio y los desarrollos institucionales que contribuyen a crear el llamado «ambiente oportuno» para la adopción y los programas de extensión que apoyan a los agricultores en el conocimiento y la información sobre la roca fosfórica.

### Políticas de precio

Pocos de los países menos adelantados han sido capaces de ejecutar y mantener políticas de precio para los cultivos y los fertilizantes destinadas a crear una estabilidad y una adecuación en el marco de la fijación de los precios y de proporcionar los incentivos para la adopción de las tecnologías de cultivo utilizando los fertilizantes. La estabilidad de precios debe ser asegurada en los países que deciden desarrollar sus recursos de roca fosfórica. La estabilidad de precios y la rentabilidad son necesarias para que los agricultores adopten en general el uso de los fertilizantes y en particular del fósforo como capital de inversión. Los incentivos en la fijación de los precios son necesarios para estimular a los agricultores a utilizar las cantidades adecuadas de los nutrientes apropiados para las plantas sosteniendo de esta manera la producción agrícola a través de la inversión en el mantenimiento de la fertilidad del suelo. La política de precios debe ser tal que mantiene las relaciones costos/beneficios favorables para las actividades de cultivo de los agricultores en comparación con aquellas fuera de la finca (Teboh, 1995; World Bank, 1994).

En este contexto, se pueden adelantar dos razones para considerar los subsidios a los fertilizantes. En primer lugar, solamente una producción en gran escala puede lograr las economías de escala. A los precios actuales, la demanda nunca aumentará a los niveles necesarios para obtener los bajos precios de producción mientras que los precios nunca disminuirán debido a la falta de demanda. Los subsidios pueden romper este círculo vicioso. Además, esto permite que los innovadores apliquen un nuevo producto, política y técnicamente deseado a precios accesibles. Es relativamente fácil controlar un subsidio que establece una relación entre el precio normal y el precio más bajo de producción en gran escala. Además, este desaparece automáticamente cuando la producción de la roca fosfórica aumenta. La segunda razón para subsidiar la roca fosfórica es el interés de la comunidad en mantener la fertilidad de sus suelos, algo que sobrepasa el interés individual del agricultor.

### Políticas de organización

Una organización eficiente y adecuada es esencial para que los suministros de los fertilizantes y otros insumos se hagan en el momento oportuno, del tipo y la cantidad adecuados y al precio correcto. La incapacidad para crear organizaciones adecuadas ha también limitado el crecimiento en el empleo de los fertilizantes en muchos países de África. Además de la distribución de los fertilizantes, la distribución de la roca fosfórica como capital de fósforo sobrecarga el sistema de comercialización y distribución debido a que grandes cantidades adicionales de producto deben ser transportados del sitio de la mina a las zonas de consumo. El manejo de grandes cantidades de material requiere una organización a todos los niveles, a saber extracción, procesamiento, transporte, almacenamiento y comercialización.

### **Mercados de los productos agrícolas**

Se asume que el mejoramiento de la fertilidad del suelo conduce a un aumento de la producción. Para el agricultor individual, esta es la razón principal para aplicar la roca fosfórica. Sin embargo una parte o la totalidad de la producción adicional deben ser vendidas en el mercado. En muchos países los mercados de los productos agrícolas están fragmentados. En el África occidental, el mercado del algodón es el mejor organizado en términos de comercialización y de distribución, incluyendo los fertilizantes. Por otro lado, la aplicación de las tecnologías modernas y de los insumos para los cereales tradicionales es restringida ya que los agricultores son a menudo incapaces de vender los excesos de producción a precios razonables. La promoción de la roca fosfórica con la finalidad de conservar y restaurar la fertilidad del suelo podría requerir medidas del gobierno a fin de asegurar una salida para los productos tradicionales de las explotaciones agrícolas. Sin embargo, la trampa de reinstalar los antiguos comités de comercialización debe ser evitada. Una solución podría ser establecer precios mínimos por debajo de los niveles normales de mercado pero garantizar cada venta. Si estos problemas de comercialización no son enfrentados, las innovaciones tecnológicas quedarán restringidas a los cultivos rentables promisorios tales como el algodón, el arroz, algunas hortalizas y los productos con demanda establecida por la agroindustria, por ejemplo el maní.

### **Protección contra los riesgos**

La agricultura depende considerablemente de las condiciones climáticas. En particular, los riesgos de la explotación agrícola son altos en las zonas áridas y semiáridas. Muchos agricultores no desean invertir en la agricultura o realizar préstamos frente a tal incertidumbre. Las instituciones de crédito hesitan a menudo para proporcionar préstamos porque temen problemas de pago. Esto impide la introducción de aquellas nuevas tecnologías que requieren inversiones de capital.

Algún tipo de seguro contra los riesgos podría ayudar a los agricultores y los bancos a aliviar este problema. Mientras que los costos prohibitivos excluyen una cobertura completa del riesgo sobre los beneficios, los sistemas de seguro limitado podrían ser posibles, por ejemplo replanteando las condiciones de devolución del préstamo en el caso de la pérdida del cultivo y un pago temporal de los intereses a partir de un fondo especial. Las intervenciones del gobierno para apoyar a los agricultores y las instituciones de crédito podrían ser deseables a fin de mantener los riesgos de financiamiento a niveles aceptables.

### **Políticas de investigación y de extensión**

A pesar que gran cantidad de investigación y considerable atención han sido dirigidas a los temas de la adopción de tecnologías, no se ha desarrollado un consentimiento general con respecto a las condiciones sociales y económicas que conducen a los agricultores a adoptar nuevas prácticas de producción. Se ignora porque algunos agricultores adoptan nuevas tecnologías y otros no. Tal como han mostrado Rauniyar y Goode (1992), la adopción de las prácticas tecnológicas tiende a ser realizada de una manera interrelacionada. Por lo tanto, los programas deben enfatizar la adopción de paquetes de tecnologías mas bien que la adopción de prácticas individuales o de un paquete conteniendo todas las prácticas.

Los países en las zonas como el Sahel presentan un déficit en las instalaciones necesarias de investigación y de extensión para promover el uso de los fertilizantes y tecnologías asociadas. La investigación es necesaria para desarrollar las recomendaciones de los fertilizantes específicas para cada localidad, incluyendo el uso de las enmiendas como la roca fosfórica y para permitir a los servicios de extensión de capacitar a los agricultores y productores sobre el uso de los fertilizantes y de mejorar los servicios prestados. Debido a que las rocas fosfóricas difieren en sus niveles de reactividad

y los cultivos difieren en sus necesidades de P (demanda y patrón de absorción), es necesario identificar las dosis apropiadas de aplicación de roca fosfórica para los diferentes sistemas de cultivo en las diversas zonas agroclimáticas. La investigación agrícola aplicada y los servicios de extensión deberían estar equipados para desempeñar eficientemente sus funciones. Además de aconsejar a los agricultores sobre la aplicación de las prácticas agrícolas recomendadas en base a los resultados de la investigación, los servicios de extensión deberían ayudar a los agricultores para comprender los impactos negativos al medio ambiente asociados con las diversas prácticas agrícolas. Más específicamente, los agricultores de escasos recursos deben ser conocedores de todas las implicancias relacionadas con el empleo de las tecnologías proporcionadas por los organismos externos (Teboh, 1995; World Bank, 1994).

La perspectiva de mercado y de infraestructura conceptualiza la diseminación de las innovaciones como un proceso que comprende tres actividades principales: (i) el establecimiento de una agencia de diseminación para que la innovación esté disponible para el cliente, (ii) la selección y ejecución de estrategias que incluyen la fijación de los precios y la comunicación promocional para inducir la adopción y, (iii) la adopción de la innovación por el cliente. Esta perspectiva es complementaria a la perspectiva tradicional de la adopción. Las actitudes de los agricultores y su dotación de recursos así como los ambientes sociopolíticos y físicos en los cuales ejecutan sus actividades diarias son determinantes potenciales de su comportamiento de adopción.

En general, los agricultores adoptan más rápidamente las innovaciones cuando: (i) comprenden que las innovaciones tienen una ventaja relativa sobre las prácticas existentes, (ii) las innovaciones son compatibles o conformes con sus propios valores, (iii) las innovaciones son fáciles de entender y utilizar, (iv) las innovaciones pueden ser investigadas en una escala limitada y, (v) las innovaciones son capaces de producir resultados evidentes (Rogers, 1983).

## ESTUDIOS DE CASO SOBRE LA EXPLOTACIÓN Y UTILIZACIÓN DE LA ROCA FOSFÓRICA

En la segunda mitad de los años 1990 el IFDC y el Banco Mundial condujeron varios estudios de caso sobre la utilización de la roca fosfórica siguiendo iniciativas internacionales. El Cuadro 30 presenta un resumen de los resultados de un estudio del Banco Mundial (World Bank, 1997) realizado para Burkina Faso, Madagascar y Zimbabwe. El Cuadro 31 presenta los resultados de un estudio realizado por el IFDC para Malí y que está basado en la misma metodología (según diferentes regiones y cultivos) (Henao y Baanante, 1999). Ambos estudios informan sobre tasas de retorno substanciales en base al precio asumido de la roca fosfórica y beneficios ambientales importantes, pero también los mejores resultados a nivel de la explotación agrícola se obtienen si se aplican fuentes alternativas de fertilizante fosfatado industrial.

Limitaciones del mismo tipo que las discutidas anteriormente son identificadas como restricciones de la demanda potencial. Su eliminación, conjuntamente con un firme compromiso político y un enfoque completo de la explotación de la roca fosfórica, serán necesarios para que su aplicación sea una propuesta exitosa.

En el estudio del IFDC en Malí, se resalta que las limitaciones de riesgo y de crédito son los factores que reducen el incentivo para aplicar los fertilizantes. Otro estudio hecho en Malí basado en los datos del Banco Mundial (Kuyvenhoven *et al.*, 1998a, 1998b) analiza los beneficios de los agricultores que han adoptado la roca fosfórica con el financiamiento de un préstamo asumiendo que la escasez de lluvia reduce los rendimientos en 50 por ciento cada tres años. En esas condiciones los agricultores serán incapaces de hacer frente a sus obligaciones financieras en los años malos y necesitarán un refinanciamiento de sus préstamos. Este factor limitará el deseo de los agricultores de aplicar la roca fosfórica y también afectará otros componentes como la disposición de las instituciones financieras para prolongar el crédito.



CUADRO 30

## Matriz de los costos y beneficios asociados a las inversiones en rocas fosfóricas

Descripción	Burkina Faso	Madagascar	Zimbabwe
<b>Reservas de rocas fosfóricas</b>			
Cantidad (millones de toneladas)	63,0	0,6	47,4
Tipo	Sedimentaria	Guano	Ígnea
Reactividad	Moderada	Alta	Baja
<b>Aumento de rendimiento acumulado (kg/ha)<sup>1</sup></b>			
Maíz	3 262	25 000	4 050
Sorgo			
Mijo	3 249		
Arroz no pilado	1 801	5 020	
<b>Costos de la roca fosfórica</b>			
Salida de fábrica (\$ EE.UU./ton)	152,6	103,4	37,3
Puesta en finca (\$ EE.UU./ha)	78-110	92-372	35-45
<b>Beneficios de la roca fosfórica (valor neto actual, \$ EE.UU./ha)<sup>2</sup></b>			
<i>Privado -Total</i>	131-137	3 878-7 492	500-517
Efecto sobre rendimiento	122-128	3 878-7 492	500-517
Fijación biológica de nitrógeno	9	854-938	
<i>Ambiental -Total</i>	317		210
Protección contra la degradación de las tierras	208		147
Secuestro de carbono	99		
Protección contra la contaminación del fosfoyeso	10		63
<i>Otros (no medidos)</i>			
Seguridad alimentaria	Alto	Alto	Medio
Ahorros en divisas	Medio	Alto	Bajo
Igualdad entre generaciones	Alto	Medio	Medio
Impacto sobre las mujeres	Positivo	Desconocido	Desconocido
Prevención de la erosión suelo/sedimentación	Medio	Medio	Bajo
Conservación de biodiversidad/bosques	Bajo	Alto	Medio
<b>Otros impactos globales desfavorables para el medio ambiente</b>			
Daños ecológicos	Mínimo	Moderado	Mínimo
Costo de rehabilitación de las tierras (\$ EE.UU./ton)	Insignificante	2,2	1,0
Eutrofización	Mínimo	Mínimo	Mínimo
<b>Distribución de los beneficios (valor neto actual, \$ EE.UU./ha) [en %]<sup>3</sup></b>			
Privado/Local	270 (46)	2 775 (43)	867 (81)
Nacional	208 (35)	3 534 (55)	147 (14)
Global	109 (19)	129 (2)	63 (5)
Descripción	Burkina Faso	Madagascar	Zimbabwe
<b>Valor neto actual de los productos alternativos (\$ EE.UU./ha)<sup>4</sup></b>			
<i>Privado</i>			
Superfosfato triple importado	360		
Superfosfato doble			1 302-1 313
<i>Ambiental</i>			
Superfosfato triple importado	307		
Superfosfato doble			216
<b>Análisis de sensibilidad (valor neto actual, \$ EE.UU./ha)<sup>5</sup></b>			
Beneficios privados	90-219		381-731
Beneficios totales	482-725	8 561-6 750	906-1 299
<b>Demanda potencial en toneladas P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (roca fosfórica) por año</b>	21 400 (79 300)	21 300 (106 500)	20 500 (58 600) <sup>6</sup>
<b>Limitaciones sobre las inversiones en roca fosfórica</b>			
Propiedad de la tierra	Posible	Posible	Posible
Crédito	Seria	Seria	Seria
Ecológica (producción de roca fosfórica)	Ninguna	Incierta	Ninguna
Extensión	Moderada	Moderada	Baja
Competencia de industrias existentes	Ninguna	Ninguna	Alta
Ambiente pro fijación de precios	Poco probable	Poco probable	Poco probable
<b>Condiciones necesarias para el éxito</b>			
Compromiso político	Esencial y disponible	Esencial y disponible	Esencial y desconocido
Eliminación de limitaciones	Necesario	Necesario	Necesario
Inversión en paquetes compuestos	Esencial	Esencial	Esencial

<sup>1</sup> A partir de una aplicación basal de roca fosfórica.<sup>2</sup> Los intereses de los beneficios privados y ambientales son de 10 y 3 por ciento, respectivamente.<sup>3</sup> Basados en una tasa de interés de 3 por ciento.<sup>4</sup> El producto alternativo más rentable se incluye aquí.<sup>5</sup> Las tasas de interés varían entre 5 y 15 por ciento para los beneficios privados y entre 1 y 5 por ciento para los beneficios totales.<sup>6</sup> Concentrados de roca fosfórica.

Fuente: World Bank, 1997.



CUADRO 31  
Distribución de los beneficios para estrategias seleccionadas de fertilización

Región	Sistema de cultivo	Fertilización		Beneficios*			
		Basal (kg/ha)	Anual	Privado (\$ EE.UU./ha)	Ambiental (\$ EE.UU./ha)	Total (\$ EE.UU./ha)	Ambiental %
Sikasso	MC	RFT:120		647,8	403,5	1 051,3	38,4
		RFT:120	SFT:15	1 021,3	403,5	1 414,9	28,5
	MM	RFT:120		325,6	344,2	669,8	51,4
		RFT:120	SFT:15	633,5	344,2	967,8	35,6
Segou	CC	RFT:120		600,1	412,8	1 012,9	40,8
		RFT:120	SFT:15	1 200,3	412,8	1 603,2	25,7
	MiG	RFT:120		605,7	351,0	956,7	36,7
		RFT:120	SFT:15	793,7	351,0	1 134,8	30,9
Kayes	MiMi	RFT:120		380,4	345,2	725,6	47,6
		RFT:120	SFT:15	599,8	345,2	925,1	37,3
	GMa	RFT:120		390,3	377,8	768,1	49,2
		RFT:120	SFT:15	672,9	377,8	1 040,8	36,3
Koulikoro	GG	RFT:120		386,1	399,0	785,1	50,8
		RFT:120	SFT:15	672,9	377,8	1 040,8	36,3
	SG	RFT:120		788,6	370,9	1 159,5	32,0
		RFT:120	SFT:15	1 032,3	370,9	1 393,4	26,6
Mopti	SS	RFT:120		582,7	365,6	948,3	38,6
		RFT:120	SFT:15	728,9	365,3	1 084,6	33,7
	Arroz	RFT:120		836,9	433,0	1 269,9	34,1
		RFT:120	SFT:15	1 111,9	433,0	1 545,0	28,0
Mijo	RFT:120		311,8	356,2	667,9	53,3	
	RFT:120	SFT:15	499,8	356,2	846,1	42,1	

RFT: Roca fosfatada de Tilemsi ; SFT: superfosfato triple.

\* Tasas de descuento: beneficios privados = 10 por ciento; beneficios ambientales = 3 por ciento.

Fuente: Henao y Baanante, 1999.

En un estudio en Burkina Faso, Hien *et al.* (1997) encontraron que los agricultores confrontados con riesgos pueden renunciar a los beneficios más altos de la roca fosfórica con respecto a los del fertilizante comercial y escoger este último producto más soluble. Solamente en el caso de un abastecimiento limitado del fertilizante comercial, los agricultores preferirán la roca fosfórica, especialmente la del tipo parcialmente acidulada.

En una revisión sobre el uso de los fertilizantes en el África occidental semiárida, Shapiro y Sanders (1998) concluyeron que bajo las condiciones existentes de la producción agrícola «los fertilizantes inorgánicos importados son la única manera técnicamente eficiente y económicamente rentable de superar las limitaciones actuales de la fertilidad del suelo y las medidas alternativas de mantenimiento de la fertilidad del suelo tales como los abonos orgánicos y la roca fosfórica natural deben ser consideradas como complementos mas bien que sustitutos de los fertilizantes inorgánicos importados, hasta que una investigación más amplia las haga mas exitosas».

Como la mayoría de estudios de caso lo demuestran, la aplicación de la roca fosfórica parece interesante y beneficiosa ya que mejora la calidad del suelo y aumenta los rendimientos. Sin embargo, un proyecto para la aplicación de roca fosfórica también encontrará numerosos problemas. Muchos agricultores en los países de menores recursos no poseen los insumos complementarios y, por lo tanto, no son capaces de aplicar la roca fosfórica de manera adecuada. Durante los períodos culminantes de la campaña agrícola, la mano de obra es escasa. La aplicación de la roca fosfórica aumentará la demanda de mano de obra, particularmente durante estos períodos. Cuando la mano de obra es escasa, puede ocurrir una situación en la que el agricultor no será capaz de aprovechar de los beneficios de la aplicación de la roca fosfórica debido a la siembra tardía o la incapacidad de cosechar completamente los excedentes de producción. También ocurren otros problemas con la aplicación de la roca fosfórica. El desarrollo de

la roca fosfórica requiere una gran inversión inicial. Como los agricultores no pueden obtener el crédito de un banco debido a una insuficiente garantía, no podrán financiar fácilmente las compras de roca fosfórica. Otro problema se relaciona con la disposición de los agricultores para adoptar la aplicación de la roca fosfórica como una técnica para mejorar la fertilidad del suelo. La investigación muestra que el uso de los fertilizantes en los países de escasos recursos económicos es extremadamente limitado. Gran parte del conocimiento sobre las técnicas de mejoramiento del suelo para los cultivos alimenticios ha sido diseminado por los agricultores mismos más bien que por los extensionistas agrícolas. Finalmente, la falta de infraestructura puede impedir el abastecimiento oportuno y adecuado de roca fosfórica a los agricultores, lo que constituye una de las condiciones necesarias para convencerlos para adoptar esta tecnología.

Antes de que un proyecto de inversión sobre la aplicación de la roca fosfórica pueda ser introducido exitosamente se necesitan otras medidas y actividades. Estas incluyen: (i) enfrentar los problemas de crédito y de derechos de la tierra, (ii) mejorar y ampliar la infraestructura rural, (iii) mejorar las redes de comercialización y distribución y, (iv) aumentar la eficiencia de los servicios de extensión. El aseguramiento de los derechos de propiedad de la tierra para los agricultores aumentará su capacidad para solicitar créditos y su disposición para invertir en su tierra. La infraestructura rural necesita ser mejorada y ampliada a fin de garantizar el suministro adecuado y oportuno de la roca fosfórica a los agricultores. Una infraestructura rural mejorada también tendrá un impacto favorable sobre la distribución de los productos agrícolas hacia las zonas urbanas. Ambos, los agricultores y los ciudadanos de menores recursos se beneficiarán de la reducción de los costos de transporte. Es necesario desarrollar contactos eficientes entre los agricultores y el personal de extensión de tal manera que los servicios de extensión sean efectivos.

## COMERCIALIZACIÓN DE ROCAS FOSFÓRICAS LOCALES PARA APLICACIÓN DIRECTA

Diversos países han importado grandes cantidades de roca fosfórica para aplicación directa. En el año 2000, Malasia importó 500 000 toneladas, Brasil 320 000 toneladas, Nueva Zelandia 130 000 toneladas e Indonesia 230 000 toneladas en 1998. En otros países, las rocas fosfóricas locales han sido molidas y vendidas para uso doméstico en escala relativamente pequeña con resultados variados. Las ventas de roca fosfórica dependen de la oferta y la demanda por las mismas, de la competencia con los fertilizantes fosfatados importados, de las políticas del gobierno y de otros elementos. Las siguientes secciones proveen informaciones sobre la comercialización de las rocas fosfóricas locales en algunos países donde los agricultores han utilizado las rocas fosfóricas para la producción agrícola.

### América Latina

En Colombia hay varios depósitos de roca fosfórica. La única roca fosfórica que es vendida en el mercado para uso agrícola es la de Huila, de reactividad mediana (nombre del producto: Fosforita Huila). En 1994, una compañía llamada Fosfacol vendió 25 000 toneladas de la roca fosfórica de Huila, o sea cerca del 15 por ciento del consumo anual de fertilizantes fosfatados de Colombia. Según la compañía, las ventas están aumentando. Sin embargo no hay datos recientes de las ventas.

En el Perú, hay un depósito inmenso de roca fosfórica de alta reactividad (Sechura o Bayovar). Sin embargo, no se ha realizado una molienda en gran escala de este depósito para comercialización debido a diversos problemas. Pequeñas cantidades de la roca fosfórica de Sechura son comercializadas en el país y para exportación a Chile para la aplicación directa.

En Chile, la roca fosfórica de Bahía Inglesa de alta reactividad ha sido comercializada para uso en las pasturas y las rotaciones de cultivos en los suelos derivados de cenizas

volcánicas del sur del país. Una compañía llamada Bifox comercializa el producto bajo el nombre de Fosfato Natural Chileno. Durante los últimos 10 años, el promedio del consumo anual de roca fosfórica ha sido, según informes, de unas 10 000 toneladas de Fosfato Natural Chileno.

En Brasil, los intentos para utilizar los numerosos depósitos de roca fosfórica para la aplicación directa produjeron malos resultados agronómicos debido a la baja reactividad de las rocas fosfóricas y la aplicación directa se ha interrumpido. Algunas fuentes locales de roca fosfórica son utilizadas para producir termofosfatos mediante la fusión a altas temperaturas de las mezclas de roca fosfórica y escorias básicas.

En Venezuela, los recursos existentes de roca fosfórica no son muy reactivos, excepto una roca fosfórica. Una compañía llamada Pequiven utiliza la roca fosfórica de Riecito para fabricar productos de roca fosfórica parcialmente acidulada de grado comercial. La compañía comercializa los productos bajo el nombre de Fosfopoder y vende hasta 150 000 toneladas por año.

### Asia

En India, varios depósitos de roca fosfórica han sido explotados en gran escala para utilización en el proceso químico de acidulación. Al comienzo de la década de 1980, una compañía llamada «Phosphate, Pyrite and Chemicals Ltd.» comenzó a promocionar la roca fosfórica de Mussoorie de baja reactividad (nombre del producto: Mussoorie Phos) para la aplicación directa. En 1993–94, las ventas de roca fosfórica Mussoorie para uso agrícola fueron unas 107 000 toneladas. Sin embargo el suministro de la roca fosfórica de Mussoorie ha ido disminuyendo debido a las reservas limitadas de esta roca y a una nueva política del gobierno de reducir la explotación de las rocas fosfóricas. Una compañía llamada «Rajasthan State Mines and Minerals Ltd.» ha vendido la roca fosfórica de Jhamarkotra de baja reactividad (nombre del producto: Raji Phos) para los cultivos perennes de plantación en los suelos ácidos de las zonas costeras de la región sudoeste del país.

En Sri Lanka, la explotación de la roca fosfórica de Eppawala de baja reactividad comenzó en 1974 con un nivel de producción de 3 000 – 5 000 toneladas. En esa época, el país importaba cerca de 50 000 toneladas por año de roca fosfórica para la aplicación directa. Desde 1992, una compañía llamada «Lanka Phosphate Ltd.» ha aumentado regularmente la producción de la roca fosfórica de Eppawala hasta 32 000 toneladas por año mientras que las importaciones de roca fosfórica han disminuído a 8 000 toneladas. En 1998, el consumo de la roca fosfórica de Eppawala ascendió a 13 000 toneladas de  $P_2O_5$ , representando cerca del 43 por ciento del total del  $P_2O_5$  utilizado en el país. La roca fosfórica de Eppawala es utilizada principalmente para las plantaciones como el té, caucho y cocotero.

### África subsahariana

En términos de elementos nutritivos, el fósforo ha sido uno de los mayores factores limitantes de la producción de los cultivos en el África subsahariana. La falta de una industria doméstica desarrollada de los fertilizantes fosfatados y la disponibilidad limitada de divisas para las importaciones de los fertilizantes han impedido a los agricultores de escasos recursos la utilización de fertilizantes caros. El uso promedio de los fertilizantes fosfatados en el África subsahariana es alrededor de 1,5 kg  $P_2O_5$  por hectárea (los valores medios en Asia y América Latina son 34 y 20 kg  $P_2O_5$ /hectárea, respectivamente). Numerosos estudios han intentado determinar si los depósitos locales de roca fosfórica en el África subsahariana pueden servir como fuentes de P a fin de mejorar la fertilidad del suelo y la producción de los cultivos.

En Malí, la roca fosfórica del Valle de Tilemsi, de reactividad media ha sido encontrada adecuada para la aplicación directa en los suelos ácidos para el cultivo de algodón, maíz, arroz, mijo y sorgo. Toda la producción de roca fosfórica es empleada

en el país. La producción estimada de roca fosfórica molida fue 4 529 toneladas en 1981, 8 092 toneladas en 1988, 11 000 toneladas en 1989 y 18 560 toneladas en 1990. Entre 1991 y 1994, la planta de producción estuvo a menudo cerrada como resultado de disturbios políticos en la región de la mina. El potencial estimado de producción es de 36 000 toneladas por año.

En Burkina Faso, la roca fosfórica de Kodjari, de reactividad baja a media ha sido explotada en pequeña escala (cerca de 1 000 toneladas anuales en promedio). En 1993-1994, la producción de roca fosfórica para la aplicación directa fue de 2 200 toneladas. La roca fosfórica molida ha sido promocionada para una variedad de cultivos como maíz, arroz y caña de azúcar. La capacidad potencial estimada de producción es de 3 600 a 10 000 toneladas por año.

En Nigeria, una gran reserva de roca fosfórica de baja a media reactividad ha sido descubierta recientemente en el estado de Sokoto, en el norte del país. Estudios recientes han mostrado que la efectividad agronómica de la roca fosfórica de Sokoto en términos de superfosfato simple fue de 40 por ciento en los alfisoles, 100 por ciento en los ultisoles y 160 por ciento en los oxisoles. Los resultados de los ensayos de campo indicaron que en el primero, segundo y tercer año de cultivo la efectividad agronómica de la roca fosfórica de Sokoto (en términos de superfosfato simple) fue 54, 83 y 107 por ciento, respectivamente. Un producto fosfatado recientemente desarrollado (nombre del producto: Crystal Super) producido mezclando la roca fosfórica de Sokoto y un mineral natural de talco magnesita, ha sido comercializado por una compañía llamada «Crystal Talc Nigeria, Ltd.» en Kaduna. La compañía comercializa unas 5 000 toneladas anuales de este fertilizante.

En la República Unida de Tanzania, el depósito de roca fosfórica de Minjingu de alta reactividad fue puesto en explotación en 1983. La producción fue de unas 20 000 toneladas por año (para acidulación) hasta que la planta cerró a comienzos de 1990. Sobre una producción registrada de 2 500 toneladas en 1994, unas 1 800 – 2 000 toneladas fueron exportadas a Kenya, donde fue empleada para la aplicación directa y para la producción de superfosfato simple mientras que 500 a 700 toneladas fueron vendidas para la aplicación directa en el norte de Tanzania. La mina y la planta de procesamiento operan actualmente en escala muy limitada.

Recientemente, el Centro Internacional para Investigaciones en Agroforestería (ICRAF) ha informado sobre resultados promisorios obtenidos en ensayos agronómicos para el uso de la roca fosfórica de Minjingu y la roca fosfórica de Busumbu (Uganda), de baja reactividad para diferentes sistemas de cultivo, incluyendo la agroforestería.

### **CRITERIOS ECONÓMICOS PARA LA ADOPCIÓN Y USO DE LA ROCA FOSFÓRICA – ESTUDIO DE CASO EN VENEZUELA**

Venezuela ha planificado aumentar en 46 por ciento las tierras bajo cultivo hacia el año 2018. El éxito de estos esfuerzos para expandir la economía agroindustrial del país dependerá de muchos factores. El más importante de estos está relacionado con las grandes cantidades de fertilizante requeridas a fin de obtener una alta productividad agrícola en las zonas tropicales y subtropicales con: (i) los cultivos permanentes tales como caña de azúcar, café, cacao, árboles frutales, yuca, pasturas mejoradas y bosques cultivados, cubriendo más de 6 millones de hectáreas y, (ii) los cultivos anuales como maíz, sorgo, arroz, leguminosas de grano, cultivos oleaginosos y algodón en más de 700 000 hectáreas. Los precios de los tradicionales fertilizantes fosfatados solubles en agua como el superfosfato simple, el superfosfato triple, los fertilizantes NPK y los fosfatos de amonio son elevados.

Cerca del 70 por ciento de los suelos agrícolas de Venezuela son ácidos, con arcillas de baja actividad y una alta capacidad de retención de P. Esta situación, así como las grandes reservas de roca fosfórica y el aumento del costo de los fertilizantes fosfatados

importados, han promovido una diversificación en la producción de los fertilizantes fosfatados, especialmente de los fertilizantes producidos a partir de las fuentes locales de roca fosfórica (Casanova *et al.*, 1998). Se ha propuesto una utilización más racional de estos fertilizantes fosfatados para disminuir la dependencia de los fertilizantes importados (Casanova, 1993).

### Evaluación agronómica y mercado interno potencial

La búsqueda de los medios más eficientes para utilizar los recursos locales de fosfatos comenzó con el muestreo de los tres principales depósitos de roca fosfórica existentes en Venezuela: Monte Fresco y Navay (estado de Táchira) y Riecito (estado de Falcón). Una planta piloto produjo las rocas fosfóricas parcialmente aciduladas con los ácidos  $H_2SO_4$  y  $H_3PO_4$ . El Cuadro 32 muestra las principales características de los productos obtenidos.

Se realizaron estudios para evaluar la efectividad agronómica de las rocas fosfóricas naturales y las rocas fosfóricas parcialmente aciduladas en varios cultivos y tipos de suelo. Las investigaciones se concentraron en la búsqueda del método de procesamiento para la producción de fertilizantes fosfatados de bajo costo a partir de la acidulación parcial de las rocas fosfóricas locales. Diversos institutos nacionales de investigación, universidades, compañías de asistencia técnica y productores participaron en estas investigaciones. Organizaciones internacionales como el IFDC (EE.UU.A.), CIRAD y Technifert (Francia), CIAT (Colombia) y FAO/IAEA proporcionaron asistencia adicional. La efectividad agronómica de estas rocas fosfóricas parcialmente aciduladas (de concentraciones de 20 – 30 por ciento  $P_2O_5$  y grados de acidulación de 40 por ciento o más) fueron evaluadas en varios cultivos y tipos de suelo empleando técnicas convencionales e isotópicas. Estas rocas fosfóricas parcialmente aciduladas dieron resultados excelentes en comparación a los fertilizantes tradicionales. Comparados con el promedio nacional, se obtuvieron incrementos de rendimiento de 29 a 100 por ciento en sorgo, maíz, caña de azúcar, soya y pasturas (Casanova, 1998; Casanova *et al.*, 1998).

Los resultados de las evaluaciones antes mencionadas, algunas de las cuales se realizaron durante un período de más de 10 años, llevaron a las siguientes conclusiones: (i) rendimientos agronómicos y eficiencias comparables a aquellas del superfosfato triple fueron obtenidos empleando las rocas fosfóricas parcialmente aciduladas (de concentraciones de 20 – 30 por ciento  $P_2O_5$  y grados de acidulación de 40 por ciento y más altos) en cultivos anuales como el sorgo, la soya, el maíz y en cultivos permanentes como el café y las pasturas y, (ii) un pronóstico a mediano plazo del mercado interno potencial para las rocas fosfóricas parcialmente aciduladas de unas 490 000 toneladas por año.

### Estudio económico de la producción de roca fosfórica parcialmente acidulada

El siguiente paso fue establecer el camino más económico para convertir de manera rentable la roca fosfórica en roca fosfórica parcialmente acidulada. Los siguientes factores fueron tomados en cuenta: (i) los depósitos de roca fosfórica explotables y económicamente viables, la infraestructura de extracción y la capacidad instalada de producción y, (ii) el proceso de producción de la roca fosfórica parcialmente acidulada (método de procesamiento, otras materias primas, sinergia del procesamiento existente y la calidad del producto).

#### Fuente de roca fosfórica

El depósito de roca fosfórica de Riecito mostró ser la opción más interesante ya que el depósito estaba en explotación

CUADRO 32  
Rocas fosfóricas parcialmente aciduladas obtenidas de diversos depósitos de Venezuela

Roca fosfórica	RFPA	
	Concentración (% $P_2O_5$ )	Grado de Acidulación (%)
Riecito	25-33	40-60
Monte Fresco	25-34	15-40
Navay	20-24	40



comercial por la compañía Pequiven. Existían suficientes reservas de roca fosfórica y la capacidad de producción instalada en la mina de Riecito era suficiente para apoyar un proyecto de producción que podría satisfacer el mercado potencial estimado de roca fosfórica parcialmente acidulada en Venezuela.

La capacidad de producción para el proyecto inicial fue fijada en 150 000 toneladas de roca fosfórica parcialmente acidulada por año, equivalente a un tercio del mercado interno potencial estimado de roca fosfórica parcialmente acidulada. El depósito de Riecito puede satisfacer más de 20 años de producción a esta capacidad, además de reunir los requerimientos de provisión de roca fosfórica para otras plantas de producción de fosfatos (fosfato diamónico y NPK) en el Complejo de Morón. El Cuadro 33 muestra la capacidad actual de  $P_2O_5$  instalada en el complejo.

### *Proceso de producción*

Desde el punto de vista del procesamiento, es posible producir comercialmente las rocas fosfóricas de diversas maneras utilizando las mismas líneas que para el superfosfato simple y el superfosfato triple. El proceso seleccionado debe ser aquel que produce los mayores beneficios posibles sobre la inversión. Con esta finalidad, los siguientes factores fueron tomados en consideración: la calidad de la roca fosfórica de Riecito, la simplicidad del proceso, la integración con las instalaciones existentes y la disponibilidad de otras materias primas y de servicios.

La calidad de la roca fosfórica fue un factor muy importante para decidir el camino de procesamiento a seguir. Basados en la experiencia acumulada durante siete años de evaluación de la roca fosfórica de Riecito (acidulación, digestión, granulación, etc.) en «Petróleos de Venezuela, Centro de Investigación y Apoyo Tecnológico» y un examen de las tecnologías disponibles, se determinó que el proceso más atractivo para las condiciones específicas de Pequiven debería tener las siguientes características: (i) utilizar las instalaciones para la acidulación combinada con los ácidos sulfúrico y fosfórico para proveer la flexibilidad para producir la roca fosfórica parcialmente acidulada variando de 20 a 30 por ciento  $P_2O_5$ , (ii) ser capaz de utilizar  $H_3PO_4$  diluido con un amplio rango de contenido de sólidos (26 por ciento  $P_2O_5$  y de 0 a 30 por ciento de sólidos) para permitir un uso eficiente del reflujo del clarificador de la planta de ácido fosfórico de Morón y, (iii) poder realizar las dos operaciones de acidulación y granulación de la roca fosfórica parcialmente acidulada en una sola etapa para simplificar el proceso.

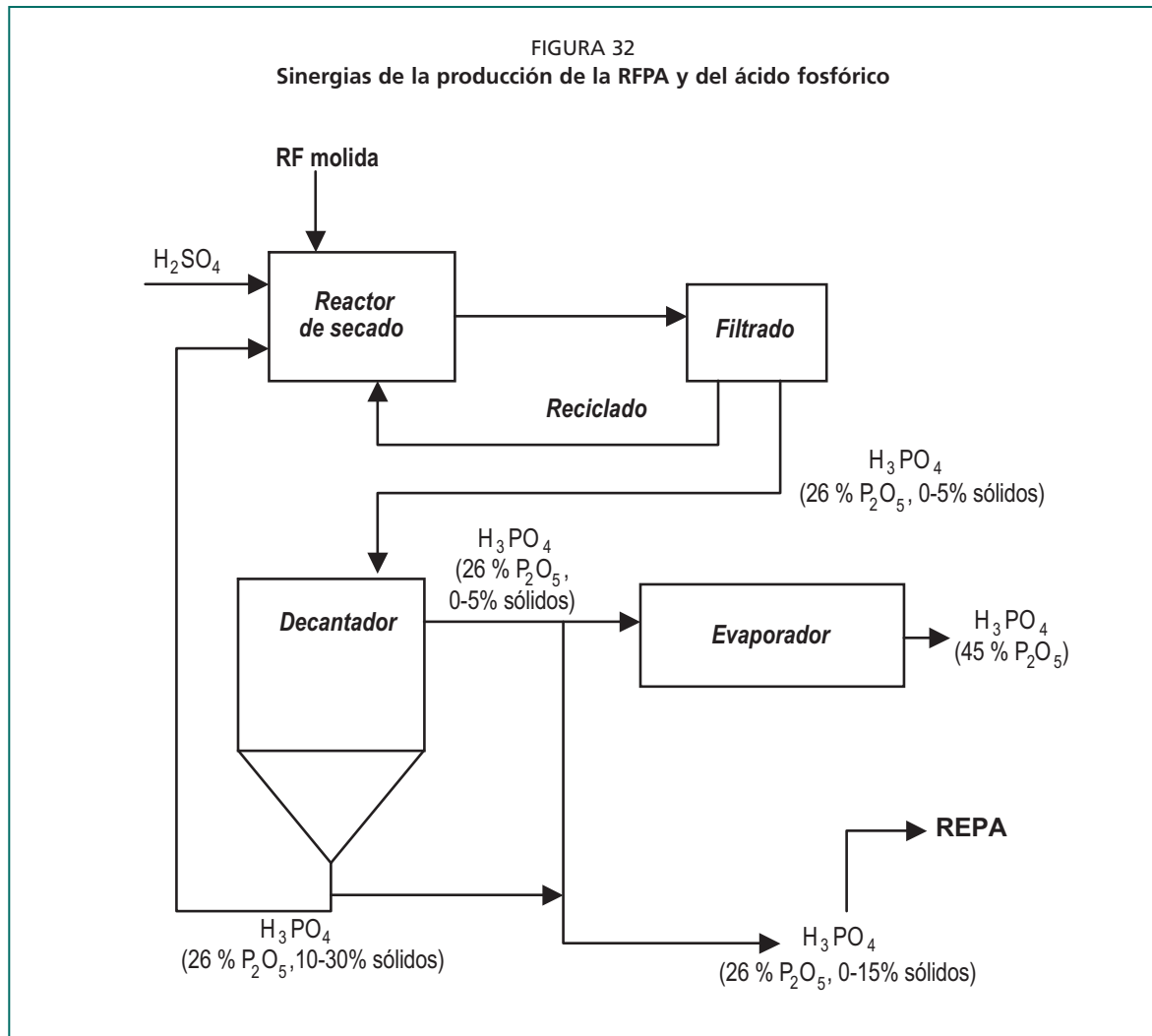
El proceso seleccionado para la planta de roca fosfórica parcialmente acidulada de Morón está basado en el método de una sola etapa de acidulación roca fosfórica-ácido sulfúrico desarrollado por el IFDC (Schultz, 1986). Sin embargo, con la experiencia acumulada en el «Petróleos de Venezuela, Centro de Investigaciones y Apoyo Tecnológico» sobre la acidulación de la roca fosfórica de Riecito fue posible simplificar el proceso eliminando la etapa de enfriamiento para la producción de la roca fosfórica parcialmente acidulada. La Figura 32 muestra como el ácido para la producción de la roca fosfórica parcialmente acidulada es tomado de la planta de ácido fosfórico. La etapa de digestión en el reactor de deshidratación ha sido optimizada para el ácido fosfórico con un contenido reducido de sólidos que es recirculado al reactor, proveniente de la concentración de los fondos del clarificador (decantador) y del filtro de ácido para preparar la roca fosfórica parcialmente acidulada antes de la etapa de evaporación. Se estima que este incremento puede representar hasta un 10 por ciento de la capacidad de producción de la planta de ácido fosfórico. Esto tiene un impacto significativo sobre la economía de la producción de los fertilizantes fosfatados (fosfato diamónico, NPK, roca fosfórica parcialmente acidulada) en el Complejo de

CUADRO 33

**Capacidad actual de producción de  $P_2O_5$  en el Complejo Morón**

Producto	Toneladas/año	$P_2O_5$
Roca fosfórica parcialmente acidulada	150 000	37 500
$H_3PO_4$	200 000	90 000
<b>Total</b>	<b>350 000</b>	<b>127 500</b>





Morón y es un buen indicador para la rentabilidad de la inversión en la producción de roca fosfórica parcialmente acidulada en este lugar.

### Prueba de evaluación en planta piloto

Una evaluación en planta piloto (500 kg/h de roca fosfórica parcialmente acidulada) fue realizada en las instalaciones del IFDC en los Estados Unidos de América (IFDC, 1996) para probar el proceso de producción propuesto. Los resultados de la evaluación confirmaron la factibilidad de producir la roca fosfórica parcialmente acidulada a través del proceso de etapa única acidulación/granulación, empleando una combinación de los acidulantes que incluían el  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , el  $\text{H}_3\text{PO}_4$  y el  $\text{H}_3\text{PO}_4$  diluido con un amplio rango de contenido de sólidos (26 por ciento  $\text{P}_2\text{O}_5$ , 0 a 30 por ciento de sólidos). Se confirmó también que no era necesario el uso de un equipo enfriador del producto, ya que la roca fosfórica parcialmente acidulada de Riecito tenía propiedades físicas excelentes. El Cuadro 34 provee un resumen de los resultados obtenidos durante la evaluación en la planta piloto. Estos resultados ayudaron a desarrollar la base del diseño para una planta comercial de 150 000 toneladas de roca fosfórica parcialmente acidulada por año en el Complejo de Morón.

### Calidad de la roca fosfórica parcialmente acidulada

Tomando en cuenta la evaluación agronómica de los diversos productos de roca fosfórica parcialmente acidulada (a partir de la roca fosfórica de Riecito y otras fuentes)

CUADRO 34

**Resultados de la evaluación en la planta piloto**

Característica	Resultado	Comentarios
Proceso acidulación/granulación en una sola etapa	Factible	Proceso estable
Uso combinado de H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> (26 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , 0-30 % sólidos) y de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (90-98 %)	Factible	
Eficacia de la granulación	> 90 %	
Grado de acidulación	40-60 %	Predecible/calculable
Concentración de la roca fosfórica parcialmente acidulada (% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	25-30 %	Calculable
Calidad del producto		
CRH (a 30 °C)	85-90 %	Alto (excelente) CRH
Dureza	> 4 kg	Fertilizante típico > 2 kg
Resistencia al choque	< 1,5 %	Típico MAF/DAF < 1,5 %
Resistencia a la abrasión	< 1,5 %	Típico MAF/DAF < 2%
Higroscopicidad (a 30 °C) (mg/cm <sup>3</sup> )	< 60	Fertilizante típico, no higroscópico < 150

y el deseo de tener una roca fosfórica parcialmente acidulada con un grado P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> cercano al grado P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> promedio de la roca fosfórica de Riecito *in situ*, se decidió que la roca fosfórica parcialmente acidulada producida en el Complejo de Morón debería tener una concentración de 25 por ciento P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y un grado de acidulación de 50 por ciento. Sin embargo, se consideró también que la planta debería tener la flexibilidad para producir roca fosfórica parcialmente acidulada en el rango de concentración de 20–30 por ciento P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y un grado de acidulación de 40–60 por ciento.

Para determinar y pronosticar las proporciones requeridas de los ácidos sulfúrico y fosfórico y de la roca fosfórica que serían necesarios para producir una roca fosfórica parcialmente acidulada de cierta calidad (contenido P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y grado de acidulación), se desarrolló un programa de cálculo basado en la reacción estequiométrica de la roca fosfórica de Riecito en acidulación combinada. El programa predice la relación óptima entre los ácidos necesitados y permite establecer las condiciones del proceso y los costos variables asociados.

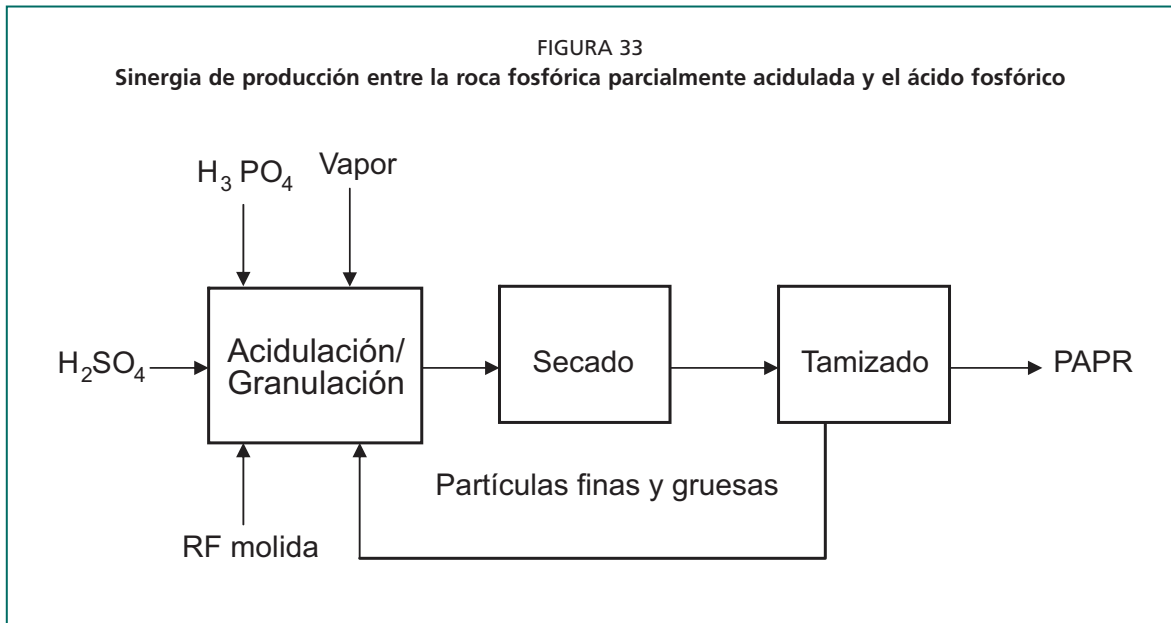
### La planta de roca fosfórica parcialmente acidulada en Morón

El proyecto de diseño para la planta de roca fosfórica parcialmente acidulada comenzó en 1995 y en 1997 se inició la ingeniería detallada, la etapa de construcción y la compra de los equipos. La capacidad de producción de 150 000 toneladas por año (19 toneladas/h, sobre la base de 24 h/día con un factor de servicio de 330 días/año) determinó los tamaños de los equipos de procesamiento necesarios. Desde la realización de las pruebas de garantía de instalación en noviembre 1998, el producto roca fosfórica parcialmente acidulada ha logrado los estándares de calidad físicos y químicos requeridos. El fertilizante roca fosfórica parcialmente acidulada se comercializa en Venezuela bajo el nombre Fosfopoder. La Figura 33 muestra el diagrama de flujo del procesamiento con las seis secciones que constituyen la planta. La planta de roca fosfórica parcialmente acidulada tiene un sistema de control distribuido (las plantas reciben automáticamente las informaciones). Los paneles de operación del sistema están localizados en el área de control de los fosfatos así como lo están todas las funciones de control de operación en el Complejo de Morón (Dominguez y Barreiro, 1998).

### Materias primas y productos

La planta de roca fosfórica parcialmente acidulada en Morón tiene la flexibilidad de utilizar un amplio rango de concentraciones de las materias primas. La experiencia del personal operacional y el programa de cálculo instalado en los paneles de control permiten ajustar la producción y la calidad del producto.

El programa de cálculo está basado sobre las reacciones químicas y el balance de los materiales para la acidulación de la roca fosfórica de Riecito con los ácidos sulfúrico y fosfórico y las ecuaciones de transferencia de calor que ocurren en el proceso. De esta



manera es posible estimar las proporciones teóricas de las materias primas con relación al producto. La calidad de la roca fosfórica parcialmente acidulada producida (grado y porcentaje de acidulación) ha validado estos cálculos.

Con respecto a la calidad del producto, el uso de la roca fosfórica acidulada al 40–60 por ciento permite obtener una calidad de roca fosfórica parcialmente acidulada con las especificaciones de calidad químicas y físicas similares a otras rocas fosfóricas parcialmente aciduladas con una acidulación de 40–60 por ciento.

En 1999, el primer año completo de operaciones, las ventas en el mercado interior fueron de alrededor de 15 000 toneladas de roca fosfórica parcialmente acidulada (10 por ciento de la capacidad de la planta). Esto puede ser considerado como un éxito debido a que la roca fosfórica parcialmente acidulada es un producto nuevo en el mercado de Venezuela. En un futuro cercano la planta se concentrará en la producción de la roca fosfórica parcialmente acidulada de 25 por ciento  $P_2O_5$  y 50 por ciento de acidulación. La producción es vendida en el mercado bajo el nombre de marca genérico de Fosfopoder.

## Capítulo 11

# Legislación y control de calidad de las rocas fosfóricas para la aplicación directa

Muchos países, especialmente aquellos en desarrollo, disponen de legislación para asegurar que la calidad física y química de los fertilizantes comerciales reúnan las especificaciones establecidas por los gobiernos y proteger los intereses de los consumidores. Sin embargo, en algunos países desarrollados, por ejemplo los Estados Unidos de América, es posible vender fertilizantes sin especificaciones con tal que reúnan los requisitos conforme al etiquetado («*truth in labelling*»).

En 1998, el consumo de la roca fosfórica para aplicación directa representó menos del dos por ciento del consumo mundial de  $P_2O_5$  (Maene, 2003). Las informaciones disponibles en la literatura sobre la legislación respecto a la roca fosfórica como fertilizante para la aplicación directa son también escasas. Este capítulo revisa una parte de la legislación existente sobre la roca fosfórica para aplicación directa en algunos países. Luego se presentan diversos aspectos relacionados con la legislación y se recomiendan directivas de legislación para el control de la calidad de la misma.

### LEGISLACIÓN ACTUAL SOBRE LAS ROCAS FOSFÓRICAS PARA APLICACIÓN DIRECTA

La mayoría de la legislación relacionada con la roca fosfórica para aplicación directa incluye tres especificaciones principales: el contenido de  $P_2O_5$  total de la roca fosfórica, la propiedad química (solubilidad) y la propiedad física (tamaño de partículas). En los siguientes párrafos se presentan ejemplos de las legislaciones adoptadas en los países que utilizan la roca fosfórica para aplicación directa.

En 1976, el Consejo de las Comunidades Europeas publicó una directiva (*Official Journal of the European Communities*, 1976) relacionada con las especificaciones de la roca fosfórica para aplicación directa como sigue: (i) un mínimo de 25 por ciento de  $P_2O_5$  total; (ii) por lo menos 55 por ciento del  $P_2O_5$  total soluble en el ácido fórmico al dos por ciento y, (iii) por lo menos 90 por ciento pasando a través de malla 0,063 mm (250 *mesh Tyler*) y 99 por ciento a través de 0,125 mm (115 *mesh Tyler*) para la distribución del tamaño de partículas.

En Malasia, la utilización de la roca fosfórica está ampliamente difundida desde la década de 1950 para las plantaciones (por ejemplo, palma aceitera y caucho). En el año 2000, Malasia importó casi 500 000 toneladas de roca fosfórica de diversos orígenes. En 1998, el Departamento de Normas de Malasia revisó las especificaciones establecidas en 1972 como sigue: (i) un mínimo de 28 por ciento de  $P_2O_5$ , (ii) por lo menos 7,5 por ciento de  $P_2O_5$  (en peso) soluble en ácido cítrico al dos por ciento y, (iii) 90 por ciento pasando la malla de menos de 0,50 mm (32 *mesh*) para la distribución del tamaño de partículas (Malaysian Standard, 1998). Las rocas fosfóricas no molidas, tal como son recibidas pueden ahora reunir el requerimiento de tamaño de partículas estipulado por la legislación de Malasia.

En Brasil, el consumo de las rocas fosfóricas altamente reactivas, importadas, no molidas, tal como son recibidas, por ejemplo las de Gafsa (Túnez), Arad (Israel), Daoui (Marruecos) y Djebel Onk (Argelia) aumentó marcadamente a cerca de 320 000 toneladas en el año 2000 (ANDA, 2001). El Ministerio de Agricultura de Brasil publica

las regulaciones para el «fosfato natural reactivo, tal como recibido» (Regulaciones Nos. 9, 63, 161 y 19), que especifican lo siguiente: (i) un mínimo de 28 por ciento de  $P_2O_5$  total; (ii) por lo menos nueve por ciento de  $P_2O_5$  en peso soluble en el ácido cítrico al dos por ciento, (iii) 100 por ciento pasando menos de cuatro malla (4,8 mm) y 80 por ciento menos de siete malla (2,8 mm) con una tolerancia de 15 por ciento para las partículas más grandes de 4,8 mm y, (iv) un contenido de calcio (Ca) de 30–35 por ciento.

En India, el consumo de las rocas fosfóricas, principalmente locales de baja reactividad y de baja calidad para la aplicación directa fue de cerca de 25 000 toneladas como  $P_2O_5$  en 1998 (Maene, 2003). Las importaciones de la roca fosfórica están sujetas a un impuesto de importación del cinco por ciento. Las especificaciones para la roca fosfórica publicadas en 1985 por la «Indian Fertilizer (Control) Order» son: (i) un mínimo de 18 por ciento de  $P_2O_5$  total y, (ii) 90 por ciento pasando menos de 100 malla (0,15 mm) y el 10 por ciento restante deben pasar a menos de 60 malla (0,25 mm). En la legislación no hay requerimiento de solubilidad mínima de la roca fosfórica.

En Nueva Zelanda, el uso de las rocas fosfóricas importadas y reactivas para la aplicación directa se incrementó de 102 000 toneladas en 1996 a 130 000 toneladas en 2000, equivalente a cerca del 10 por ciento de todos los productos fosfatados vendidos ya sea en base al peso o al valor (Quin y Scott, 2003). En Nueva Zelanda y en Australia no hay ninguna legislación sobre la roca fosfórica para aplicación directa. En general, la roca fosfórica reactiva se define como aquella que contiene 30 por ciento del  $P_2O_5$  total soluble en el ácido cítrico al dos por ciento bajo condiciones estándares (Quin y Scott, 2003; Hedley y Bolan, 2003). Comparado con el ácido cítrico al dos por ciento y el citrato de amonio neutro, el método del ácido fórmico al dos por ciento predice mejor la efectividad agronómica de las rocas fosfóricas de diversa reactividad y tamaño de partículas (Hedley y Bolan, 2003; Bolland y Gilkes, 1997). Sin embargo, el ácido cítrico al dos por ciento permanece como un método estándar en Nueva Zelanda y en Australia.

## ASPECTOS RELACIONADOS

Los principales factores que afectan la efectividad agronómica de la roca fosfórica para aplicación directa son: (i) las propiedades intrínsecas de la roca fosfórica, (ii) el tipo de suelo, (iii) el cultivo, (iv) las prácticas de manejo y, (v) las condiciones agroclimáticas (Chien y Menon, 1995b; Hammond *et al.*, 1986b; Khasawneh y Doll, 1978; Rajan *et al.*, 1996). El Capítulo 5 proporciona más detalles sobre estos aspectos.

Todas las regulaciones relacionadas con la roca fosfórica para aplicación directa se concentran en el control de calidad de las diferentes fuentes de roca fosfórica a saber: (i) el contenido de  $P_2O_5$  total, (ii) la solubilidad de la roca fosfórica y, (iii) la distribución del tamaño de partículas. Es necesario discutir los aspectos de estas propiedades físicas y químicas de la roca fosfórica relacionados con la legislación para la roca fosfórica para aplicación directa.

### Contenido de $P_2O_5$ total de la roca fosfórica

El contenido de  $P_2O_5$  total de una roca fosfórica no guarda ninguna relación con su reactividad química y eficiencia agronómica. En efecto, una roca fosfórica con un contenido muy alto (33 a 40 por ciento) de  $P_2O_5$  total puede indicar que la reactividad química de la roca fosfórica es potencialmente baja. En vista de que una mayor sustitución de  $PO_4$  por  $CO_3$  en la estructura de la apatita resulta en un contenido más bajo de  $P_2O_5$  total y en una reactividad química más alta, un contenido muy alto de  $P_2O_5$  total sugiere que la roca fosfórica tiene muy baja sustitución de  $PO_4$  por  $CO_3$  en la estructura de la apatita y por lo tanto una baja reactividad química (Rajan *et al.*, 1996). El Cuadro 35 presenta los datos de algunas rocas fosfóricas con grandes variaciones en la relación  $CO_3/PO_4$  de la apatita, el contenido de  $P_2O_5$  total y la solubilidad en una

solución de citrato de amonio neutro. La solubilidad está estrechamente asociada a la relación  $\text{CO}_3/\text{PO}_4$  de la apatita pero no al contenido total de  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Por lo tanto, la inclusión de un contenido mínimo de  $\text{P}_2\text{O}_5$  total en la legislación no debe hacerse en base a consideraciones agronómicas sino solamente a la necesidad de proteger a los usuarios de la roca fosfórica de proveedores inescrupulosos.

### SOLUBILIDAD DE LA ROCA FOSFÓRICA

La efectividad agronómica de la roca fosfórica depende en gran parte de su reactividad química. Esta se determina convencionalmente midiendo la solubilidad de la roca fosfórica en las soluciones de extracción. Los tres métodos de extracción más comúnmente utilizados (Chien y Hammond, 1978) son :

- citrato de amonio neutro: una muestra de 1 g de roca fosfórica es extraída con 100 ml de solución de citrato de amonio neutro a 65 °C durante una hora; este método es empleado principalmente en los Estados Unidos de América.
- ácido cítrico al 2 por ciento: una muestra de 1 g de roca fosfórica es extraída con 100 ml del ácido cítrico al 2 por ciento a temperatura ambiente durante una hora; este es probablemente el método más común de los tres en los países donde la roca fosfórica ha sido utilizada, por ejemplo, en Brasil, Malasia y Nueva Zelanda.
- ácido fórmico al 2 por ciento: una muestra de 1 g de roca fosfórica es extraída con 100 ml del ácido fórmico al 2 por ciento a temperatura ambiente durante una hora; este método es usado en los países de la Unión Europea.

Si bien un método dado especifica las condiciones de extracción tales como la relación sólido-solución, temperatura y tiempo de extracción, no hay especificaciones sobre otras condiciones que pueden afectar la medición de la solubilidad, por ejemplo los tipos de equipos de agitación (p. ej., horizontal, oscilante, recíproco, barra de agitación magnética), la velocidad de agitación o el movimiento durante la extracción y el tamaño de los frascos de agitación usados. Por lo tanto, no hay un método universal para medir la solubilidad de las rocas fosfóricas.

Sin embargo, aún si un método especificara todas las condiciones para medir la solubilidad de la roca fosfórica, hay otros aspectos que afectarían las mediciones.

### Expresión de la solubilidad de la roca fosfórica

La solubilidad de la roca fosfórica es comúnmente expresada como el porcentaje del  $\text{P}_2\text{O}_5$  total. Por ejemplo, una roca fosfórica tiene 30 por ciento de  $\text{P}_2\text{O}_5$  total y su  $\text{P}_2\text{O}_5$  soluble en el citrato de amonio neutro es seis por ciento cuando una muestra de 1 g de muestra es extraída con 100 ml de solución. La solubilidad de la roca fosfórica en el citrato de amonio neutro es entonces expresada como 20 por ciento del  $\text{P}_2\text{O}_5$  total. Sin embargo, cuando se compara la solubilidad de las rocas fosfóricas que varían ampliamente en su contenido de  $\text{P}_2\text{O}_5$  total, es más apropiado expresar la solubilidad en porcentaje de la roca (en base al peso) (Chien y Hammond, 1978; Chien, 1993, 1995). La expresión en «porcentaje del  $\text{P}_2\text{O}_5$  total» puede conducir a una comparación incorrecta cuando se utilizan fuentes de roca fosfórica de bajo contenido de  $\text{P}_2\text{O}_5$  total. El Cuadro 36 muestra este efecto del grado de  $\text{P}_2\text{O}_5$ . La solubilidad en el citrato de amonio neutro expresada como un porcentaje de la mezcla de roca fosfórica y arena fue relativamente constante (5,5–6,0 por ciento) hasta una mezcla 50:50 roca fosfórica-

CUADRO 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

Fuente de RF <sup>a</sup>	$\text{CO}_3/\text{PO}_4$	$\text{P}_2\text{O}_5$ total	$\text{P}_2\text{O}_5$ soluble en CAN <sup>b</sup>
(% de la roca)			
Carolina del Norte, EE UU	0,26	30,0	7,6
Arad, Israel	0,20	32,4	7,1
El-Hassa, Jordania	0,16	31,3	5,8
Hahotoe, Togo	0,11	36,8	3,9
Idaho, EE UU	0,08	32,3	3,5
Kaiyang, China	0,05	17,6	3,4
Araxa, Brasil	<0,01	36,1	2,8
Dorowa, Zimbabwe	<0,01	33,1	1,9
Sukulu Hills, Uganda	<0,01	41,0	1,6

a. molida a tamaño menor de 100 mesh (<0.15 mm).

b. ácido cítrico neutro, segunda extracción.



CUADRO 36

**Solubilidad en citrato de amonio neutro de las mezclas de roca fosfórica de Carolina del Norte con arena**

Composición de la Mezcla		Contenido % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> total	Solubilidad en CAN	
RF	Arena		% de la mezcla	% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> total
0,91	0,09	27,2	5,7	21,0
0,86	0,14	25,7	5,9	23,0
0,80	0,20	23,9	6,0	25,1
0,69	0,31	20,6	5,6	27,2
0,65	0,35	19,4	5,7	29,4
0,50	0,50	14,9	5,5	36,9
0,25	0,75	7,6	4,0	61,8

Fuente: Lehr y McClellan, 1967.

CUADRO 37

**Solubilidad en citrato de amonio neutro de las rocas fosfóricas con diversos contenidos de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total**

Fuente de RF	Contenido % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> total	Solubilidad en CAN	
		% de la roca	% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> total
Huila, Colombia	20,9	3,5	16,2
Pesca, Colombia	19,8	1,8	9,5
Sechura, Perú	29,9	5,3	18,0
Gafsa, Túnez	29,9	5,5	18,6
Carolina del Norte, EE.UU.A.	30,0	6,7	22,4
Florida Central, EE.UU.A.	32,7	3,2	9,7
Tennessee, EE.UU.A.	30,1	2,8	8,9

Fuente: Chien y Hammond, 1978.

arena. Por otro lado, la solubilidad en el citrato expresada como porcentaje del P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total se incrementó de 21,0 a 61,8 por ciento cuando el P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total de la roca fosfórica fue diluida de 27,2 a 7,6 por ciento. La solubilidad en el citrato expresada como porcentaje de la mezcla fue constante debida al hecho de que la solubilidad de una apatita dada está fijada por su constante producto de solubilidad (Chien y Black, 1976).

En un estudio para comparar varios métodos de laboratorio para predecir el potencial agronómico de las rocas fosfóricas para aplicación directa, Chien y Hammond (1978) observaron que la solubilidad de dos rocas fosfóricas de bajo grado (Pesca y Huila) pareció aumentar con respecto a las otras fuentes cuando la solubilidad fue expresada como porcentaje del P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total mas bien que como porcentaje de la roca (Cuadro 37). Por ejemplo, la roca fosfórica de Huila y la roca fosfórica de Florida Central tienen casi la misma solubilidad en el citrato expresada como porcentaje de la roca. Cuando la solubilidad fue expresada como porcentaje de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total, la roca fosfórica de Huila pareció tener una solubilidad más alta que la roca fosfórica de Florida Central. Braithwaite *et al.* (1989, 1990) también informaron que el contenido de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total de la roca fosfórica afectó su solubilidad medida con el ácido cítrico al dos por ciento y el ácido fórmico al dos por ciento. Cuando un 1 g de muestra de cualquier roca fosfórica fue utilizada para la medición, las rocas fosfóricas con un contenido de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> más bajo tuvieron una ventaja sobre las rocas fosfóricas con contenido más alto de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total.

Por consiguiente, aparentemente la solubilidad de la roca fosfórica expresada como porcentaje de la roca y no como porcentaje del P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total proporciona una evaluación más exacta cuando se compara la solubilidad de fuentes de roca fosfórica con una gran variación en su contenido de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total.

**Efecto de los carbonatos libres**

El carbonato ligado a la estructura de la apatita es el que determina la solubilidad de la roca fosfórica y no el carbonato total (que puede también incluir los carbonatos libres tales como la calcita y la dolomita como minerales accesorios en la roca fosfórica). La

CUADRO 38

## Solubilidad de rocas fosfóricas medida por diversos métodos químicos de extracción

Fuente de RF	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> soluble, % de la roca			
	Citrato de amonio neutro		Ácido cítrico 2%	Ácido fórmico 2%
	Primera extracción	Segunda extracción		
Huila, Colombia	0,9	3,5	5,3	6,2
Pesca, Colombia	1,8	1,8	6,9	5,3
Sechura, Perú	5,3	5,3	15,2	21,9
Gafsa, Túnez	4,8	5,5	14,0	22,3
Carolina del Norte, EE.UU.A.	7,1	6,7	15,9	25,8
Florida Central, EE.UU.A.	3,0	3,2	8,5	8,3
Tennessee, EE.UU.A.	2,5	2,8	8,7	6,9

Fuente: Chien y Hammond, 1978.

presencia de los carbonatos libres en cantidad significativa puede reducir la solubilidad de la roca fosfórica. La disminución aparente en la solubilidad de la apatita es debido al efecto del ion común del Ca y al consumo de las soluciones de extracción, que ocurre debido a que los carbonatos libres son más solubles que la apatita.

Chien y Hammond (1978) midieron la reactividad de siete rocas fosfóricas con varios métodos de extracción química (Cuadro 38). La solubilidad del fósforo en el citrato de amonio neutro permaneció relativamente constante entre la primera y segunda extracciones para cada roca fosfórica, excepto para la roca fosfórica de Huila. La roca fosfórica de Huila contiene cerca de 10 por ciento de CaCO<sub>3</sub> libre lo que impidió la solubilización de la apatita durante la primera extracción pero no durante la segunda extracción. MacKay *et al.* (1984) también encontraron que el P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> soluble en el citrato de la roca fosfórica de Chatham Rise (Nueva Zelanda), que contiene 27,6 por ciento de CaCO<sub>3</sub> libre incrementó de 3,2 por ciento en la primera extracción a 10,1 por ciento en la segunda extracción.

Los datos en el Cuadro 38 indican que la solubilidad de la roca fosfórica de Huila también estuvo reducida por el CaCO<sub>3</sub> libre en la roca fosfórica cuando fue medida en el ácido cítrico al 2 por ciento y en el ácido fórmico al 2 por ciento cuando se comparan los valores de la segunda extracción en el citrato de amonio neutro de la roca fosfórica de Huila y de la roca fosfórica de Florida Central. Sin embargo, el grado en que el CaCO<sub>3</sub> libre afectó la solubilidad de la roca fosfórica de Huila pareció disminuir cuando la fuerza de la solución extractora se incrementó del citrato de amonio neutro al ácido cítrico al 2 por ciento y al ácido fórmico al 2 por ciento. Por lo tanto, para medir la solubilidad real de una roca fosfórica, se recomiendan la segunda extracción con el citrato de amonio neutro y el ácido cítrico al 2 por ciento cuando se compara la solubilidad de las fuentes de roca fosfórica que contienen diversas cantidades de carbonatos libres. Para el ácido fórmico al 2 por ciento, será suficiente una extracción si la roca fosfórica no contiene una cantidad importante de CaCO<sub>3</sub> libre.

### Efecto del tamaño de partículas

La solubilidad de la roca fosfórica se incrementa con la disminución del tamaño de partículas (Chien, 1993, 1995). Sin embargo la molienda muy fina de una roca fosfórica de baja reactividad no puede aumentar su solubilidad de manera significativa para compensar la naturaleza de su baja reactividad debido a la baja sustitución de PO<sub>4</sub> por CO<sub>3</sub> en la estructura de la apatita. El Cuadro 39 muestra que la solubilidad de las rocas fosfóricas de baja reactividad y finamente molidas es todavía más baja que la de las rocas fosfóricas de alta reactividad, no molidas, utilizadas tal como son recibidas. La solubilidad de la roca fosfórica de Carolina del Norte altamente reactiva y finamente molida fue significativamente más alta que su forma no molida (Cuadro 39). Sin embargo, no hay diferencias significativas en la eficiencia agronómica obtenida con las

CUADRO 39  
Solubilidad de rocas fosfóricas molidas y no molidas

Fuente de RF <sup>a</sup>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> soluble, % de la roca	
	Citrato de amonio neutro	Ácido cítrico al 2%
Gafsa (Túnez), no molida	6,3	10,6
Carolina del Norte (EE.UU.A.), no molida	6,4	10,6
Carolina del Norte (EE.UU.A.), molida	7,1	15,9
Hahotoe (Togo), molida	4,1	7,6
Kaiyang (China), molida	3,4	7,2
Araxa (Brasil), molida	2,8	5,0
Jhamarkotra (India), molida	0,6	1,5

a. No molida = 95 % <32 malla (0,50 mm); molida = 100 % <100 malla (0,15 mm).

formas finamente molidas y no molidas para las rocas fosfóricas altamente reactivas, por ejemplo la roca fosfórica de Carolina del Norte (Chien y Friesen, 1992) y la roca fosfórica de Gafsa (Chien, 1998). No es necesario moler finamente las rocas fosfóricas altamente reactivas para la aplicación directa. Por cierto, diversas rocas fosfóricas altamente reactivas para uso agronómico se hallan en formas no molidas tal como son recibidas, por ejemplo la roca fosfórica de Gafsa (Túnez), la roca fosfórica de Djebel Onk (Argelia) y la roca fosfórica de Sechura (Perú). El uso de las rocas fosfóricas no molidas para la aplicación directa economiza los costos de la molienda y también reduce la formación de polvo durante el manipuleo y la aplicación de la roca fosfórica.

Como la efectividad agronómica de la roca fosfórica depende de su solubilidad mas bien que del tamaño de partículas, las regulaciones con respecto a la roca fosfórica para aplicación directa no deberían exigir que todas las rocas fosfóricas, incluyendo las altamente reactivas, sean molidas para pasar un tamiz de 100 mallas (0,15 mm). El requerimiento mínimo de solubilidad debe estar basado en los productos de roca fosfórica realmente empleados, ya sean molidos o no molidos.

### DIRECTIVAS PARA LA LEGISLACIÓN SOBRE LA ROCA FOSFÓRICA PARA APLICACIÓN DIRECTA

Debido a que las rocas fosfóricas varían ampliamente en su composición química y mineralógica, reactividad, distribución del tamaño de partículas y minerales accesorios, es importante reconocer que todas las regulaciones sobre las rocas fosfóricas para la aplicación directa deben estar relacionadas con su efectividad agronómica. Por ejemplo, una roca fosfórica altamente reactiva, tal como es recibida, no molida, puede ser agronómicamente más eficiente que una roca fosfórica de baja reactividad, finamente molida. Si una regulación exige que la roca fosfórica sea molida a menos de 100 malla (0,15 mm), los agricultores no podrían utilizar las rocas fosfóricas más reactivas, no molidas, que pueden proporcionar mayores beneficios agronómicos y económicos para la producción agrícola que las rocas fosfóricas de baja reactividad y finamente molidas.

A continuación se proponen las siguientes directivas para consideración por los organismos regulatorios de normalización envueltos en el desarrollo de una legislación para la roca fosfórica para aplicación directa:

1. Como el contenido de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total de una roca fosfórica no está relacionado a su eficiencia agronómica, una regulación que exige un contenido mínimo de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total debe ser propuesta solamente con el propósito de proteger a los usuarios de proveedores inescrupulosos.
2. Todos los métodos actuales de medición de la solubilidad de la roca fosfórica requieren una sola extracción. Como la presencia de carbonatos libres asociados y el tamaño de partículas pueden afectar la solubilidad de la apatita, se recomienda realizar el procedimiento secuencial de dos extracciones a fin de obtener un valor

más real de la solubilidad de la roca fosfórica en la segunda extracción. Por ejemplo, si una roca fosfórica tiene una pequeña fracción de un tamaño de partícula muy fina, la solubilidad obtenida en la primera extracción puede ser relativamente alta debido al efecto del pequeño tamaño de partícula. Durante la segunda extracción, la solubilidad medida representa mejor la solubilidad real de la mayor parte de las partículas de la roca fosfórica después de que las pequeñas partículas se han disuelto en la primera extracción. El procedimiento de dos extracciones puede también eliminar el efecto depresivo de los carbonatos libres sobre la solubilidad de la apatita de las rocas fosfóricas que contienen una cantidad moderada de carbonatos libres (por ejemplo menos del 10 por ciento). Se recomienda utilizar el procedimiento secuencial de dos extracciones con el citrato de amonio neutro y el ácido cítrico al 2 por ciento. Para el método del ácido fórmico al 2 por ciento, esto puede no ser necesario debido a su fuerza relativa que puede eliminar los efectos de los carbonatos libres y del tamaño de partículas sobre la solubilidad de la apatita durante la primera extracción.

3. El valor de la solubilidad de la roca fosfórica puede ser aumentado artificialmente si es expresado como porcentaje del  $P_2O_5$  total. Por lo tanto, cuando se comparan rocas fosfóricas de bajo contenido de  $P_2O_5$  total con rocas fosfóricas de alto contenido de  $P_2O_5$  total, se recomienda expresar la solubilidad de la roca fosfórica como porcentaje de la roca. Esto elimina el posible efecto de grado, que es particularmente importante cuando se comparan las solubilidades de rocas fosfóricas con una amplia variación en el contenido de  $P_2O_5$  total.
4. En el caso de las rocas fosfóricas de alta reactividad, las formas no molidas, tal como son recibidas, son casi tan eficientes en el uso agronómico como las formas finamente molidas a pesar de que la solubilidad sea inferior con las formas no molidas. En el caso de las rocas fosfóricas de reactividad baja a media, tanto la solubilidad como la efectividad agronómica son más bajas para las formas no molidas que las finamente molidas. Por lo tanto, la legislación debe especificar por separado requerimientos de distribución del tamaño de partículas para las rocas fosfóricas altamente reactivas y las otras menos reactivas.
5. Si bien la solubilidad afecta considerablemente la reactividad y el uso potencial agronómico de la roca fosfórica, otros factores diversos tales como el pH del suelo y la especie cultivada son también importantes para la determinación final de la efectividad agronómica de la roca fosfórica. Por ejemplo, una roca fosfórica altamente reactiva puede no ser eficiente para la mayoría de cultivos alimenticios cultivados en los suelos con un  $pH > 6$ . Una roca fosfórica de baja reactividad puede ser eficiente agronómicamente para los cultivos perennes de plantaciones establecidos en los suelos ácidos. Por lo tanto, el requerimiento mínimo de solubilidad debe considerar factores agronómicos tales como el pH del suelo y la especie vegetal. Una manera posible de lograr esto es establecer un requerimiento mínimo de solubilidad para diferentes categorías correspondientes a los diferentes pH del suelo y a las exigencias de los cultivos.
6. Los requerimientos de calidad de la roca fosfórica para la acidulación química (industrial) no deben ser los mismos que aquellos para la aplicación directa. Los factores que afectan el proceso de acidulación no son los mismos que aquellos que son importantes para la roca fosfórica para aplicación directa. Por ejemplo, el contenido de sesquióxidos ( $Al_2O_3 + Fe_2O_3$ ) de la roca fosfórica es crítico para la producción del  $H_3PO_4$  y de los fertilizantes fosfatados solubles en agua mientras que esto no es un factor significativo para las rocas fosfóricas para aplicación directa. Por lo tanto la legislación sobre el control de calidad para las rocas fosfóricas para aplicación directa no debe ser la misma que aquella para la acidulación.

## Capítulo 12

# Epílogo

La utilización apropiada y racional de las rocas fosfóricas como fuente de fósforo puede contribuir al desarrollo mundial promoviendo la intensificación agrícola sostenible, en particular en los países en desarrollo dotados de recursos locales de roca fosfórica, además de la disminución de la contaminación en los países donde las rocas fosfóricas son procesadas industrialmente. Los productos de la roca fosfórica son insumos fosfatados, agronómica y económicamente interesantes, alternativos a los superfosfatos industriales. Poseen potencial para corregir la deficiencia de P, que es la principal limitación de los suelos tropicales y subtropicales. Como muchos países en desarrollo en las regiones tropicales y subtropicales importan los fertilizantes fosfatados, la utilización directa de las materias primas locales tales como las rocas fosfóricas, contribuirá no solamente a sustituir productos de importación y a economizar energía y capital sino también al mejoramiento de la fertilidad de los suelos empobrecidos y al control de la degradación de las tierras.

A pesar de que existen excelentes estudios mundiales de los depósitos y de los recursos de la roca fosfórica, una reevaluación detallada, en particular de aquellos depósitos de roca fosfórica que son más adecuados para la aplicación directa, es altamente deseable en vista de los cambios dinámicos en la tecnología y economía de la explotación minera y procesamiento así como en su utilización potencial en los países en desarrollo. El grado de la roca fosfórica para la aplicación directa no es un factor crítico desde el punto de vista técnico. Se han utilizado localmente rocas fosfóricas con menos de 20 por ciento de  $P_2O_5$ . Sin embargo el grado o contenido de nutrientes es una consideración económica importante, en particular cuando se evalúan los costos de transporte.

Los adelantos en la caracterización estandarizada, los métodos de evaluación y las tecnologías para mejorar la efectividad agronómica de las rocas fosfóricas ayudarán a mejorar el conocimiento y las técnicas de manejo para aumentar su adopción por los agricultores. Con estos avances científicos y tecnológicos será entonces posible identificar las prácticas de manejo específicas para una aplicación directa eficiente y económica de las rocas fosfóricas a fin de promover la intensificación agrícola sostenible en los países en vías de desarrollo de las zonas tropicales y subtropicales, contribuyendo así al mejoramiento de la seguridad alimentaria y al control de la degradación de las tierras. Sin embargo, se deben desarrollar tecnologías específicas para cada caso y se necesitan investigaciones adicionales para obtener resultados concluyentes.

Las tecnologías para la aplicación directa de las rocas fosfóricas ya han sido evaluadas bajo una variedad de condiciones agroecológicas. Sin embargo, la efectividad agronómica de las rocas fosfóricas depende en última instancia de un amplio rango de factores y sus interacciones. Por lo tanto, es importante desarrollar y experimentar los sistemas de apoyo a la toma de decisiones a fin de predecir su utilización eficiente y económica. Los trabajos de validación y mejoramiento de estos sistemas para lograr una predicción más exacta deben ser un proceso continuo. La disponibilidad de un sistema global de apoyo a la toma de decisiones para uso de la roca fosfórica será un instrumento útil de investigación y de extensión para los investigadores, los extensionistas, los agricultores progresistas, los planificadores y los distribuidores de los productos agrícolas. Esto ayudará a promover la utilización de los recursos de roca fosfórica en los países en desarrollo de las zonas tropicales y subtropicales. Asimismo, se sugiere que el sistema de apoyo a la toma de decisiones para el uso de la roca fosfórica debería ser una parte

integral de un sistema de decisión de más alcance para el manejo integrado de los nutrientes y el mejoramiento de la productividad del suelo o inclusive del Sistema de Apoyo a la Toma de Decisiones para la Transferencia de Agrotecnologías.

Una amplia promoción de la roca fosfórica para aplicación directa requerirá: (i) métodos y procedimientos normalizados para su caracterización y evaluación, (ii) una predicción confiable de su efectividad agronómica y, (iii) un pronóstico de la respuesta de los cultivos en términos de incrementos de rendimiento y de su rentabilidad. Los avances recientes en el conocimiento científico y en los desarrollos tecnológicos sobre la utilización de las rocas fosfóricas deben llegar a todos los sectores implicados en el desarrollo agrícola. Las tecnologías de información convencional y avanzada, particularmente las técnicas participatorias, deben ser empleadas para diseminar las tecnologías de la roca fosfórica para aplicación directa por los agricultores.

En la actualidad se conoce que las fuentes eficientes de roca fosfórica proveen no solamente fósforo para el crecimiento de las plantas sino que también aportan elementos nutritivos secundarios como el calcio y el magnesio y micronutrientes como el zinc y el molibdeno, dependiendo de la composición química y mineralógica de la roca fosfórica. Las rocas fosfóricas reactivas o aquellas rocas fosfóricas que contienen carbonatos libres (calcita y dolomita) pueden también aumentar el pH del suelo para reducir parcialmente la saturación de aluminio de los suelos ácidos y disminuir la toxicidad de Al para el crecimiento de las plantas, si bien su efecto de encalado es generalmente inferior que el de la cal. Un tema ambiental respecto a las aplicaciones de la roca fosfórica ha sido la absorción potencial por las plantas de ciertos elementos que pueden ser peligrosos para la salud humana. Algunos estudios sugieren que la absorción de los metales pesados, especialmente del cadmio, por las plantas a partir de la roca fosfórica es significativamente más baja que la de los fertilizantes fosfatados solubles en agua producidos de la misma roca fosfórica. Además, una fuente de roca fosfórica con alta reactividad y contenido elevado de cadmio puede liberar más cadmio con riesgo de ser absorbido por las plantas que una roca fosfórica de reactividad más baja y/o bajo contenido de cadmio. Además de la reactividad de la roca fosfórica y su contenido de cadmio, su absorción por las plantas también depende de las propiedades del suelo, especialmente del pH del suelo y de la especie cultivada.

Dado que en la literatura existe escasa información respecto a los nutrientes secundarios, los micronutrientes, el efecto de encalado y los elementos peligrosos asociados con la aplicación de la roca fosfórica, es deseable que se desarrollen investigaciones futuras sobre la roca fosfórica incluyendo estas áreas de tal manera que los beneficios y los riesgos relacionados con la utilización de la roca fosfórica en los suelos y las plantas puedan ser evaluados con una mayor precisión.

El mayor volumen de la producción mundial de la roca fosfórica es utilizada para la fabricación de fertilizantes fosfatados y por ello en la literatura existen escasas informaciones sobre la legislación para la roca fosfórica para aplicación directa. Las regulaciones para la aplicación directa de las rocas fosfóricas deben considerar tres factores principales: la reactividad de la roca fosfórica (solubilidad), las propiedades del suelo (principalmente el pH del suelo) y la especie cultivada. Toda la legislación actual sobre la aplicación directa de la roca fosfórica considera la calidad de la roca fosfórica, a saber: el contenido de  $P_2O_5$  total, la distribución del tamaño de partículas y la solubilidad. Los aspectos relacionados con las mediciones de la solubilidad son complejos y deben ser considerados cuidadosamente. Es difícil desarrollar una legislación universal que todos los países puedan adoptar. No obstante, la legislación a ser adoptada por un país o una región debe estar basada en la investigación en la roca fosfórica y actualizada según los recientes descubrimientos científicos. Las directivas propuestas en esta publicación proporcionan informaciones útiles para establecer y revisar la legislación relacionada a la roca fosfórica para aplicación directa.



## Referencias

- Adams, M.A. y Pate, J.S. 1992. Availability of organic and inorganic forms of phosphorus to lupins (*Lupinus* spp.). *Plant Soil*, 145: 107–113.
- Ae, N., Arihara, J., Okada, K., Yoshihara, T. y Johansen, C. 1990. Phosphorus uptake by pigeon pea and its role in cropping systems of the Indian subcontinent. *Science*, 248: 477–480.
- Aigner, M., Fardeau, J.C. y Zapata, F. 2002. Does the Pi strip method allow assessment of the available soil P?: comparison against the reference isotope method. *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, 63(1): 49–58.
- Amberger, A. 1978. Experiences with soft rock phosphate for direct fertilizer application. In: IFDC, ed. *Seminar on phosphate rock for direct application*, pp. 349–356. Muscle Shoals, Alabama, Estados Unidos de América.
- Amer, F., Boulden, D.R., Black, C.A. y Duke, F.R. 1955. Characterization of soil phosphorus by anion exchange resin adsorption and P-32 equilibration. *Plant Soil*, 6: 391–408.
- ANDA. 2001. *Statistics yearbook of the fertilizer sector*. Sao Paulo, Brasil, ANDA – National Association for Fertilizer Diffusion.
- Anderson, D.L., Kussow, W.R. y Corey, R.B. 1985. Phosphate rock dissolution in soil: indications from plant growth studies. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49: 918–925.
- Anderson, G.C. y Sale, P.W.G. 1993. Application of the Kirk and Nye phosphate rock dissolution model. *Fert. Res.*, 35: 61–66.
- Ankomah, A.B., Zapata, F., Danso, S.K.A. y Axmann, H. 1995. Cowpea varietal differences in uptake of phosphorus from Gafsa phosphate rock in a low P ultisol. *Fert. Res.*, 41: 219–225.
- Appleton, J.D. 2001. *Local phosphate resources for sustainable development in sub-Saharan Africa*. Keyworth, Nottingham, Reino Unido, National Environment Research Council, British Geological Survey and DFID.
- Arihara, J. y Karasawa, T. 2000. Effect of previous crops on arbuscular mycorrhizal formation and growth of succeeding maize. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 46: 43–51.
- Attoe, O.J. y Olson, R.A. 1966. Factors affecting rate of oxidation in soils of elemental sulphur and that added in rock phosphate-sulphur fusions. *Soil Sci.*, 101: 317–324.
- Axelrod, S. y Greidinger, D. 1979. Phosphate solubility test–interference of some accessory minerals. *J. Sci. Food Agric.*, 30:153–157.
- Baanante, C.A. 1998. Economic evaluation of the use of phosphate fertilizers as a capital investment. In: A.E. Johnston y J.K. Syers, eds. *Nutrient management for sustainable agriculture in Asia*, pp. 109–120. Wallingford, Reino Unido, CAB International.
- Baanante, C.A. y Hellums, D.T. 1998. An analysis of the potential demand for phosphate fertilizers: sources of change and projections to 2025. In: L.D. Currie y P. Loganathan, eds. *Long-term nutrient needs for New Zealand's primary industries: global supply, production requirements and environmental constraints*, pp. 7–31. Occasional Report N° 11. Palmerston North, Nueva Zelanda, Fertilizer and Lime Research Centre, Massey University.
- Babare, A.M., Gilkes, R.J. y Sale, P.W.G. 1997. The effect of phosphate buffering capacity and other soil properties on North Carolina phosphate rock dissolution, availability of dissolved phosphorus and relative agronomic effectiveness. *Aus. J. Exp. Agri.*, 8: 845–1098.
- Bachik, A.T. y Bidin, A. eds. 1992. *Proceedings of a workshop on phosphate sources for acid soils in the humid tropics of Asia*. 6–7 November 1990. Kuala Lumpur, Malaysian Society of Soil Science.
- Bagayoko, M. y Coulibaly, B.S. 1995. Promotion and evaluation of Tilemsi phosphate rock in Mali agriculture. In: H. Gerner y A.U. Mokwunye, eds. *Use of phosphate rock for sustainable agriculture in West Africa*, p.77–83. Miscellaneous Fertilizer Studies N° 11. Muscle Shoals, Estados Unidos de América, IFDC Africa.

- Bagyaraj, D.J.** 1990. Ecology of VA mycorrhizae. In: D.K. Arora, R. Bharat, K.G. Mukerji y G.R. Knudsen, eds. *Handbook of applied mycology, Vol. I. Soil and Plants*, pp. 3–34. New York, Estados Unidos de América, Marcel Dekker Inc.
- Baligar, V.C., Fageria, N.K. y Ze, Z.L.** 2001. Nutrient use efficiency in plants. *Com. Soil Sci. Plant Anal.*, 32: 921–950.
- Bangar, K.C., Yadav, K.S. y Mishra, M.M.** 1985. Transformation of rock phosphate during composting and the effect of humic acid. *Plant Soil*, 85: 259–266.
- Barber, S.A.** 1995. *Soil nutrient bioavailability. A mechanistic approach*. New York, Estados Unidos de América, John Wiley y Sons.
- Barea, J.M., Azcón, R. y Azcón-Aguilar, C.** 1983. Interactions between phosphate solubilising bacteria and VA mycorrhiza to improve plant utilization of rock phosphate in non-acidic soils. In: IMPHOS, ed. *3rd international congress on phosphorus compounds*, pp. 127–144. Bruselas.
- Barea, J.M., Toro, M., Orozco, M.E., Campos, E. y Azcón, R.** 2002. The application of isotopic ( $^{32}\text{P}$  and  $^{15}\text{N}$ ) dilution techniques to evaluate the interactive effect of phosphate-solubilising rhizobacteria, mycorrhizal fungi and *Rhizobium* to improve the agronomic efficiency of rock phosphate for legume crops. *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, 63 (1): 35–42.
- Barnes, J.S. y Kamprath, E.J.** 1975. Availability of North Carolina rock phosphate applied to soils. *N. C. Agric. Exp. St. Tech. Bull.*, 229. Raleigh, Estados Unidos de América.
- Basak, R.K., Karmakar, M. y Debnath, N.C.** 1988. Fertilizer value of partially acidulated Purulia rock phosphate. *J. Ind. Soc. Soil Sci.*, 36: 729–732.
- Bationo, A., Baethgen, W.E., Christianson, C.B. y Mokwunye, A.U.** 1991. Comparison of five soil testing methods to establish phosphorus sufficiency levels in soil fertilized with water-soluble and sparingly soluble phosphorus sources. *Fert. Res.*, 28: 271–279.
- Baudet, G., Truong, B., Fayard, C. y Sustrac, G.** 1986. La filière phosphate: du mineral à l'engrais, principaux points de repère. *Chron. Rech. Min.*, 484: 19–36.
- Bekele, T., Cino, B.J., Ehlert, P.A.I., Van der Maas, A.A. y Van Diest, A.** 1983. An evaluation of plant-borne factors promoting the solubilization of alkaline rock phosphates. *Plant Soil*, 75: 361–378.
- Besoain, E., Rojas, C. y Montenegro, A., eds.** 1999. *Las rocas fosfóricas y su posibilidad de uso agrícola en Chile*. Santiago, Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, Ministerio de Agricultura. 328 pp.
- Bever, J.D., Schultz, P.A., Pringle, A. y Morton, J.B.** 2001. Arbuscular mycorrhizal fungi: more diverse than meets the eye, and the ecological tale of why. *Bio. Sci.*, 51: 923–931.
- Black, C.A.** 1968. *Soil-plant relationships*. New York, Estados Unidos de América, John Wiley y Sons.
- Bojinova, D., Velkova, R., Grancharov, I. y Zhelev, S.** 1997. The bioconversion of Tunisian phosphorite using *Aspergillus niger*. *Nut. Cyc. Agroecosys.*, 47: 227–232.
- Bolan, N.S. y Hedley, M.J.** 1990. Dissolution of phosphate rocks in soils. 2. Effect of pH on the dissolution and plant availability of phosphate rock in soil with pH dependent charge. *Fert. Res.*, 24: 125–134.
- Bolan, N.S. y Robson, D.** 1987. Effects of vesicular-arbuscular mycorrhiza on the availability of iron phosphates to plants. *Plant Soil*, 99: 401–410.
- Bolan, N.S., White, R.E. y Hedley, M.J.** 1990. A review of the use of phosphate rocks as fertilizers for direct application in Australia and New Zealand. *Aus. J. Exp. Agric.*, 30: 297–313.
- Bolan, N.S., Hedley, M.J., Syers, J.K. y Tillman, R.W.** 1987. Single superphosphate-reactive phosphate rock mixtures. 1. Factors affecting chemical composition. *Fert. Res.*, 13: 223–239.
- Bolland, M.D.A. y Gilkes, R.J.** 1997. The agronomic effectiveness of reactive phosphate rocks, 2. Effect of phosphate rock reactivity. *Aus. J. Exp. Agric.*, 37: 937–946.
- Bolland, M.D.A., Clarke, M.F. y Yeates, J.S.** 1995. Effectiveness of rock phosphate, coastal superphosphate and single superphosphate for pasture on deep sandy soils. *Fert. Res.*, 41: 129–143.

- Bolland, M.D.A., Lewis, D.C., Gilkes, R.J. y Hamilton, L.J. 1997. Review of Australian phosphate rock research. *Aus. J. Exp. Agric.*, 37: 845–859.
- BPPT-BRGM-CIRAD-TECHNIFERT-SPIE BATIGNOLLES. 1989. *The phosphates of the Ciamis and Tuban Regions (Java - Indonesia)*. Jakarta, Ministry of Research. 110 pp.
- Braithwaite, A.C., Eaton, A.C. y Groom, P.S. 1989. Some factors associated with the use of the extractants 2% citric acid and 2% formic acid as estimators of available phosphorus in fertilizer products. *Fert. Res.*, 19: 175–181.
- Braithwaite, A.C., Eaton, A.C. y Groom, P.S. 1990. Factors affecting the solubility of phosphate rock residues in 2% citric acid and 2% formic acid. *Fert. Res.*, 23: 37–42.
- Bray, R.M. y Kurtz, L.T. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.*, 59: 39–45 British Sulphur Corporation Limited. 1987. *World survey of phosphate deposits*. Londres. 247 pp.
- Brobst, D.A. y Pratt, W.P. 1973. *United States mineral resources*. U.S. Geological Survey Professional Paper 820.
- Brundrett, M.C. 2002. Co-evolution of roots and mycorrhizas of land plants. *New Phyt.*, 154: 275–304.
- Buresh, R.J., Smithson, P. y Hellums, D.T. 1997. Building soil phosphorus capital in Africa. In: R.J. Buresh, P.A. Sánchez y F. Calhoun, eds. *Replenishing soil fertility in Africa*, pp. 111–149. Madison, Estados Unidos de América, SSSA Special Publication 51.
- Casanova, E. 1992. Las rocas fosfóricas naturales y modificadas y su uso potencial en suelos y cultivos de Venezuela. In: Palmaven-Imposfos, eds. *Memorias del curso sobre fertilización balanceada*. Valencia, Venezuela. 88 pp.
- Casanova, E. 1993. Las rocas fosfóricas y su uso agroindustrial en Venezuela. Notas Técnicas. Palmaven, Venezuela. 124 pp.
- Casanova, E. 1995. Agronomic evaluation of fertilizers with special reference to natural and modified phosphate rock. *Fert. Res.*, 41: 211–218.
- Casanova, E. 1998. Suelos y fertilización de forrajes en Venezuela. In: R. Tejos, C. Zambrano, L. Mancilla, W. García, M. Camargo, eds. *IV Seminario Manejo y utilización de pastos y forrajes en sistemas de producción animal*, pp. 129–136. Venezuela.
- Casanova, E., ed. 1998. *Manejo eficiente de los fertilizantes fosfatados con énfasis en rocas fosfóricas de aplicación directa. Manual Técnico*. FAO/OIEA Regional Project of Technical Cooperation in Latin America (ARCAL). Maracay, Venezuela. 91 pp.
- Casanova, E. y López Pérez A., eds. 1991. Alternativas como fertilizantes para los depósitos de fosfato de la América Tropical y Subtropical. *Rev. Fac. Agron. UCV*, Vol. 17, Nos. 1–4. Venezuela.
- Casanova, E., Salas, A.M. y Toro, M. 1998. Manejo eficiente de los recursos fosfatados con énfasis en rocas fosfóricas de aplicación directa en Venezuela. In: E. Casanova, ed. *Manejo eficiente de los fertilizantes fosfatados con énfasis en rocas fosfóricas de aplicación directa*, pp. 75–91. Proyecto ARCAL. Maracay, Venezuela.
- Casanova, E., Salas, A.M. y Toro, M. 2002a. Evaluating the effectiveness of phosphate fertilizers in some Venezuelan soils. *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, 63(1): 13–20.
- Casanova, E., Salas, A.M. y Toro, M. 2002b. The use of nuclear and related techniques for evaluating the agronomic effectiveness of phosphate fertilizers, in particular rock phosphate in Venezuela. I. Phosphorus uptake, utilization and agronomic effectiveness. In: *Assessment of soil P status and management of phosphatic fertilizers to optimize crop production*, pp. 93–100. Viena, IAEA, TECDOC 1272 IAEA. 473 pp.
- Casanova, E., Goitía, R., Pereira, P., Comerma, J. y Aguilar, C. 1993. Necesidades y perspectivas agronómicas de fertilizantes y enmiendas en Venezuela. *Venesuelos*, 11: 17–23.
- Castellano, M.A. y Molina, R. 1989. Mycorrhizae. In: T.D. Landis, R.W. Tinue, S.E. MacDonald y J.P. Barnett, eds. *Biological component: nursery pests and mycorrhizae*, Vol. 5. *The container tree nursery manual*, pp 101–167. Agriculture Handbook 674. Washington, DC, USDA.

- Castillo, J., Domínguez, J. y Barreiro, I. 1998. Programa de cálculo de estimación de consumos de materias primas en la producción de RPA con roca Riecito y mezclas de ácidos fosfóricos y sulfúrico. INTEVEP-PEQUIVEN Bulletin. 11p. Venezuela.
- Chalk, P.M., Zapata, F. y Keerthisinghe, G. 2002. Towards integrated soil, water and nutrient management in cropping systems: the role of nuclear techniques. In: IUSS, ed. Soil science: confronting new realities in the 21st century. Transactions 17th World Congress of Soil Science, CD ROM. p. 2164/1–2164–11. Bangkok.
- Chardon, W.J., Menon, R.G. y Chien, S.H. 1996. Iron oxide-impregnated filter paper (Pi test): a review of its development and methodological research. *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, 46: 41–51.
- Chew, K.L. 1992. Distribution and acceptance of phosphate fertilizers: a Malaysian experience. In: A.T. Bachik y A. Bidin, eds. *Proceedings of the workshop on phosphate sources for acid soils in the humid tropics of Asia*, p. 170–176. Kuala Lumpur, Malaysian Society of Soil Science.
- Chien, S.H. 1977a. Dissolution of phosphate rocks in a flooded acid soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41: 1106–1109.
- Chien, S.H. 1977b. Thermodynamic considerations on the solubility of phosphate rock. *Soil Sci.*, 123: 117–121.
- Chien, S.H. 1978. Interpretation of Bray I extractable phosphorus from acid soil treated with phosphate rock. *Soil Sci.*, 144: 34–39.
- Chien, S.H. 1982. Direct application of phosphate rocks in some tropical soils of South America: a status report. In: E. Pushparajah y S.H.A. Hamid, eds. *Phosphorus and potassium in the tropics*, pp. 519–529. Kuala Lumpur, Malaysian Society of Soil Science.
- Chien, S.H. 1992. Reactions of phosphate rocks with acid soils of the humid tropics. In: A.T. Bachik y A. Bidin, eds. *Proceedings of a workshop on phosphate sources for acid soils in the humid tropics of Asia*, pp. 18–29. Kuala Lumpur, Malaysian Society of Soil Science.
- Chien, S.H. 1993. Solubility assessment for fertilizer containing phosphate rock. *Fert. Res.*, 35: 93–99.
- Chien, S.H. 1995. Chemical, mineralogical, and solubility characteristics of phosphate rock for direct application. In: K. Dahanayke, S.J. Van Kauwenbergh y D.T. Hellums, eds. *Direct application of phosphate rock and appropriate technology fertilizers in Asia: what hinders acceptance and growth*, pp. 49–58. Kandy, Sri Lanka, Institute of Fundamental Studies, and Muscle Shoals, Estados Unidos de América, IFDC.
- Chien, S.H. 1998. Evaluation of Gafsa (Tunisia) and Djebel Onk (Algeria) phosphate rocks and soil testing of phosphate rock for direct application. In: A.E. Johnston y J.K. Syers, eds. *Nutrient management for sustainable food production in Asia*, pp. 175–185. Proc. IMPHOS-AARD/CSAR. Wallingford, Reino Unido, CAB International.
- Chien, S.H. 2003a. Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rock: a general review. In: S.S.S. Rajan y S.H. Chien, eds. *Direct application of phosphate rock and related technology: latest developments and practical experiences*. Proc. Int. Meeting, Kuala Lumpur, 16–20 July 2001. Muscle Shoals, Estados Unidos de América, IFDC. 441 pp.
- Chien, S.H. 2003b. IFDC's evaluation of modified phosphate rock products. In: S.S.S. Rajan y S.H. Chien, eds. *Direct application of phosphate rock and related technology: latest developments and practical experiences*. Proc. Int. Meeting, Kuala Lumpur, 16–20 July 2001. Muscle Shoals, Estados Unidos de América, IFDC. 441 pp.
- Chien, S.H. y Black, C.A. 1976. Free energy of formation of carbonate apatites in some phosphate rocks. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40: 234–239.
- Chien, S.H. y Friesen, D.K. 1992. Phosphate rock for direct application. In: F.J. Sikora, ed. *Future directions for agricultural phosphorus research*, pp. 47–52. Bulletin Y-224. Muscle Shoals, Estados Unidos de América, Valley Authority.
- Chien, S.H. y Friesen, D.K. 2000. Phosphate fertilizers and management for sustainable crop production in tropical acid soils. In: IAEA, ed. *Management and conservation of tropical acid soils for sustainable crop production*, pp. 73–89. IAEA-TECDOC-1159. Viena, IAEA.



- Chien, S.H. y Hammond, L.L. 1978. A comparison of various laboratory methods for predicting the agronomic potential of phosphate rock for direct application. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 42: 1758–1760.
- Chien, S.H. y Hammond, L.L. 1988. *Agronomic evaluation of partially acidulated phosphate rocks in the tropics: IFDC experience*. IFDC-P-7. Muscle Shoals, Estados Unidos de América, IFDC.
- Chien, S.H. y Hammond, L.L. 1989. Agronomic effectiveness of partially acidulated phosphate rock as influenced by soil phosphorus-fixing capacity. *Plant Soil*, 120: 159–164.
- Chien, S.H. y Menon, R.G. 1995a. Agronomic evaluation of modified phosphate rock products: IFDC's experience. *Fert. Res.*, 41: 197–209.
- Chien, S.H. y Menon, R.G. 1995b. Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rock for direct application. *Fert. Res.*, 41: 227–234.
- Chien, S.H. y Van Kauwenbergh, S.J. 1992. Chemical and mineralogical characteristics of phosphate rock for direct application. In: R.R. Campillo, ed. *First national seminar on phosphate rock in agriculture*, pp 3–31. Serie Carillanca No. 29. Temuco, Chile, Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- Chien, S.H., Clayton, W.R. y McClellan, G.M. 1980a. Kinetic dissolution of phosphate rocks in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44: 260–264.
- Chien, S.H., Hammond, L.L. y León, L.A. 1987b. Long term reactions of phosphate rocks with an oxisol in Colombia. *Soil Sci.*, 144: 257–265.
- Chien, S.H., León, L.A. y Tejada, H. 1980b. Dissolution of North Carolina phosphate rock in acid Colombian soils as related to soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44: 1267–1271.
- Chien, S.H., Menon, R.G. y Billingham, K.S. 1996. Phosphorus availability from phosphate rock as enhanced by water-soluble phosphorus. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60: 1173–1177.
- Chien, S.H., Sale, P.W.G. y Friesen, D.K. 1990a. A discussion of the methods for comparing the relative effectiveness of phosphate fertilizers varying in solubility. *Fert. Res.*, 24: 149–157.
- Chien, S.H., Sale, P.W.G. y Hammond, L.L. 1990b. Comparison of effectiveness of various phosphate fertilizer products. In: *Proceedings of international symposium on phosphorus requirements for sustainable agriculture in Asia and Oceania*, pp. 143–156. Manila, IRRI.
- Chien, S.H., Adams, F., Khasawneh, F.E. y Henao, J. 1987a. Effects of combinations of triple superphosphate and a reactive phosphate rock on yield and phosphorus uptake by corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51: 1656–1658.
- Chien, S.H., Singh, U., Van Reuler, H. y Hellums, D.T. 1999. Phosphate rock decision support systems for sub-Saharan Africa. Special issue on Soil Fertility. *Afr. Fert. Mark.*, 12: 15–22.
- Comerma, J. y Paredes, R. 1978. Principales limitaciones y potencial agrícola de las tierras en Venezuela. *Agron. Trop.*, 28: 71–85.
- Cooke, G.W. 1956. The value of phosphate rock for direct application. *Emp. J. Exp. Ag.*, 24: 295–306.
- Dabin, B. 1967. *Méthode Olsen modifiée*. Cahiers ORSTOM, Pédologie 5.3.
- Dahanayake, K., Van Kauwenbergh, S.J. y Hellums, D.T., eds. 1995. *Direct application of phosphate rock and appropriate technology fertilizers in Asia: what hinders acceptance and growth*. Kandy, Sri Lanka, Institute of Fundamental Studies, and Muscle Shoals, Estados Unidos de América, IFDC.
- Date, R.A., Grundon, N.J., Rayment, G.E. y Probert, M.E., eds. 1995. *Plant-soil interactions at low pH: principles and management. developments in plant and soil sciences*. Vol. 64. Dordrecht, Países Bajos, Kluwer Academic Publishers. 822 pp.
- DelaFuente-Martínez, J.M., Ramírez-Rodríguez, V., Cabrera-Ponce, J.L. y Herrera-Estrella, L. 1997. Aluminum tolerance in transgenic plants by alteration of citrate synthesis. *Science*, 276: 1566–1568.
- Diamond, R.B. 1979. Views on marketing of phosphate rock for direct application. In: IFDC, ed. *Seminar on phosphate rock for direct application*. Special Publication SP-1. Muscle Shoals, Estados Unidos de América, IFDC.
- Domínguez, J. y Barreiro, I. 1998. *Manual de instrucciones de trabajo para la operación de la planta RPA del complejo petroquímico Morón*. 63 pp.

- Duddridge, J.A., Malibari, A. y Read, D.J. 1980. Structure and function of mycorrhizal rhizomorphs with special reference to their role in water transport. *Nature*, 287: 834–836.
- Engelstad, O.P. y Hellums, D.T. 1993. *Water solubility of phosphate fertilizers: agronomic aspects – a literature review*. IFDC Paper Series P-17. Muscle Shoals, Estados Unidos de América, IFDC.
- Engelstad, O.P., Jugsujinda, A. y De Datta, S.K. 1974. Response by flooded rice to phosphate rocks varying in citrate solubility. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 38: 524–529.
- Enyong, L.A., Debrah, S.K. y Bationo, A. 1999. Farmers' perceptions and attitudes towards introduced soil-fertility enhancing technologies in western Africa. *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, 53(2): 177–187.
- FAO. 1984. *Fertilizer and plant nutrition guide*. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin N° 9. Rome.
- FAO. 1995a. *Integrated plant nutrition systems*, by R. Dudal y R.N. Roy, eds. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin N° 12. Rome.
- FAO. 1995b. *World agriculture: towards 2010*, by N. Alexandratos, ed. New York, Estados Unidos de América, John Wiley y Sons.
- FAO. 1998. *Guide to efficient plant nutrient management*. Land and Water Development Division, Rome.
- FAO. 1999. *Fertilizer yearbook 1998*. FAO Statistics Series N° 150. Rome.
- FAO. 2001a. *Soil and nutrient management in sub-Saharan Africa in support of the Soil Fertility Initiative*. Land and Water Development Division. AGL/MISC/31/01. Rome.
- FAO. 2001b. *Evaluation de l'efficacité agronomique des phosphates naturels pour l'application directe en Afrique de l'Ouest: synthèse des résultats agronomiques expérimentaux*, by G. Bizimungu, R.N.Roy y W. Burgos. Rome. 49 pp.
- FAO. *FAOSTAT statistics database* (disponible en <http://apps.fao>).
- Fardeau, J.C. 1981. *Cinétique de dilution isotopique et phosphore assimilable des sols*. Univ. Paris VI. (Doctoral thesis).
- Fardeau, J.C. 1993. Le phosphore assimilable des sols: sa représentation par un modèle à plusieurs compartiments. *Agronomie*, 13: 317–331.
- Fardeau, J.C. 1996. Dynamics of phosphate in soils: an isotopic outlook. *Fert. Res.*, 45: 91–100.
- Feder, G., Just, R.E. y Zilberman, D. 1985. Adoption of agricultural innovations in developing countries: a survey. *Econ. Dev. Cult. Ch.*, 33: 255–298.
- Fixen, P.E. y Grove, J.H. 1990. Testing soils for phosphorus. In: R.L. Westerman, ed. *Soil testing and plant analysis*, pp. 141–180. Book Series N° 3. Madison, Estados Unidos de América, Soil Sci. Soc. Am. Inc.
- Flach, E.N., Quak, W. y Van Diest, A. 1987. A comparison of the rock phosphate-mobilising capacities of various crop species. *Trop. Agric.*, 64: 347–352.
- Formoso, M.L.L. 1999. *Workshop on tropical soils*. Rio de Janeiro, Brazil, Brazilian Academy of Sciences. 192 pp.
- Fox, R.L. y Kamprath, E.J. 1970. Phosphorus sorption isotherms for evaluating the phosphate requirements of soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34: 902–907.
- Fox, R.L., Saunders, W.M.H. y Rajan, S.S.S. 1986. Phosphorus nutrition of pasture species: phosphorus requirement and root saturation values. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50: 142–148.
- Frederick, T., Truong, B. y Fayard, F. 1992. *Pre-feasibility study: production of modified phosphate fertilizers using Kodjari phosphate rock, Burkina Faso*. IFDC-CIRAD-TECHNIFERT. 91 pp.
- Frossard, E., Brossard, M., Hedley, M.J. y Metherell, A. 1995. Reactions controlling the cycling of P in soils. In: H. Tiessen, ed. *Phosphorus in the global environment*, p. 104–141. New York, Estados Unidos de América, John Wiley y Sons.
- Gahoonia, T.S., Claassen, N. y Jungk, A. 1992. Mobilization of phosphate in different soils by ryegrass supplied with ammonium or nitrate. *Plant Soil*, 140: 241–248.
- Gaur, A.C. 1990. *Phosphorus solubilising microorganisms as biofertilisers*. New Delhi, Omega Scientific Publ. 176 pp.



- Gerner, H. y Baanante, C.A. 1995. Economic aspects of phosphate rock application for sustainable agriculture in West Africa. In: H. Gerner y A.U. Mokwunye, eds. *Use of phosphate rock for sustainable agriculture in West Africa*, pp. 134–141. Lomé, IFDC Africa.
- Gerner, H. y Mokwunye, A.U., eds. 1995. *Use of phosphate rock for sustainable agriculture in West Africa*, pp. 77–83. Miscellaneous Fertilizer Studies N° 11. Muscle Shoals, Estados Unidos de América, IFDC Africa.
- Gillard, P, Sale, P.W.G. y Tennakoon, S.B. 1997. Building an expert system to advise on the use of reactive phosphate rock on Australian pasture. *Aus. J. Exp. Agric.*, 37: 1077–1084.
- Goedert, W.J. 1983. Management of the Cerrado soils of Brazil; a review. *J. Soil Sci.* 34: 405–428.
- Gremillion, L.R. y McClellan, G.H. 1975. Importance of chemical and mineralogical data in evaluating apatitic phosphate ores. Society of Mining Engineers of AIME. *Transactions*. Vol. 270.
- Habib, L., Chien, S.H., Carmona, G. y Henao, J. 1999. Rape response to a Syrian phosphate rock and its mixture with triple superphosphate on a limed alkaline soil. *Com. Soil Sci. Plant Anal.*, 30: 449–456.
- Habib, L., Chien, S.H., Menon, R.G. y Carmona, G. 1998. Modified iron oxide-impregnated paper strip test for soils treated with phosphate fertilizers. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 62: 972–976.
- Halder, A.K., Mishra, A.K., Bhattacharyya, P. y Chakrabartty, P.K. 1990. Solubilization of rock phosphate by *Rhizobium* and *Bradyrhizobium*. *J. Gen. App. Microbiol.*, 36: 81–92.
- Hammond, L.L. 1977. *Effectiveness of phosphate rocks in Colombian soils as measured by crop response and soil phosphorus levels*. Michigan State University, Estados Unidos de América. (Ph.D. thesis).
- Hammond, L.L. y Day, D.P. 1992. Phosphate rock standardization and product quality. In: A.T. Bachik y A. Bidin, eds. *Proceedings of a workshop on phosphate sources for acid soils in the humid tropics of Asia*, pp. 73–89. Kuala Lumpur, Malaysian Society of Soil Science.
- Hammond, L.L. y León, L.A. 1983. Agronomic effectiveness of natural and altered phosphate rocks from Latin America. In: IMPHOS, ed. 3rd international congress on phosphorus compounds, pp. 503–518. Bruselas.
- Hammond, L.L., Chien, S.H. y Easterwood, G.W. 1986a. Agronomic effectiveness of Bayovar phosphate rock in soil with induced phosphorus retention. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50: 1601–1606.
- Hammond, L.L., Chien, S.H. y Mokwunye, A.U. 1986b. Agronomic value of unacidulated and partially acidulated phosphate rocks indigenous to the tropics. *Adv. Agron.*, 40: 89–140.
- Hammond, L.L., Chien, S.H., Roy, A.H. y Mokwunye, A.U. 1989. Solubility and agronomic effectiveness of partially acidulated phosphate rocks as influenced by their iron and aluminium oxide content. *Fert. Res.*, 19: 93–98.
- Harjanto, S. 1986. *Phosphate deposits in Indonesia*. Workshop on occurrence, exploration and development of fertilizer minerals in the ESCAP region, 26–30 August 1986, Bangkok. pp. 191–197.
- Haynes, R.J. 1992. Relative ability of a range of crop species to use phosphate rock and monocalcium phosphate as P sources when grown in soil. *J. Sci. Food Agric.*, 74: 1–7.
- He, Z.L., Bian, W. y Zhu, J. 2002. Screening and identification of microorganisms capable of utilizing phosphate adsorbed by goethite. *Com. Soil Sci. Plant Anal.*, 33: 647–663.
- Hedley, M.J. y Bolan, N.S. 1997. Developments in some aspects of reactive phosphate rock research and use in New Zealand. *Aus. J. Exp. Agric.*, 37: 861–884.
- Hedley, M.J. y Bolan, N.S. 2003. Key outputs from reactive phosphate rock research in New Zealand. In: S.S.S. Rajan y S.H. Chien, eds. *Direct application of phosphate rock and related technology: latest developments and practical experiences*. Proc. Int. Meeting, Kuala Lumpur, 16–20 July 2001. Muscle Shoals, Estados Unidos de América, IFDC. 441 pp.
- Hedley, M.J., Bolan, N.A. y Braithwaite, A.C. 1988. Single superphosphate-reactive phosphate rock mixtures. 2. The effect of phosphate rock type and denning time on the amounts of acidulated and extractable phosphate. *Fert. Res.*, 16: 179–194.

- Hedley, M.J., Nye, P.H. y White, R.E. 1983. Plant induced changes in the rhizosphere of rape (*Brassica napus* cv Emerald) seedlings. IV. The effect of rhizosphere phosphorus status on the pH, phosphatase activity and depletion of soil phosphorus fractions in the rhizosphere and on the cation-anion balance in plants. *New Phyt.*, 95: 69–82.
- Heerink, N., Kuyvenhoven, A. y Van Wijk, S.M. 2001. Economic policy reforms and sustainable land use in LDCs: issues and approaches. In: N. Heerink, H. Van Keulen y M. Kuiper, eds. *Economic policy reforms and sustainable land use in LDCs. Recent advances in quantitative analysis*, pp. 1–20. Heidelberg, Alemania, Physica Verlag.
- Helleiner, G.K. 1975. Smallholder decision making: tropical African evidence. In: L.G. Reynolds, ed. *Agriculture in development theory*. New Haven, Estados Unidos de América, Yale University Press.
- Helling, C.S., Chesters, G. y Corey, R.B. 1964. Contribution of organic matter and clay to soil cation exchange capacity as affected by the pH of the saturating solution. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 28: 517–520.
- Hellums, D.T. 1991. *Factors affecting the efficiency of nonconventional phosphorus fertilizers in lowland and upland cropping systems*. Auburn University, Auburn, Estados Unidos de América. (Ph.D. thesis).
- Hellums, D.T. 1992. Role of non-conventional phosphate fertilizers in tropical agriculture: IFDC's research perspective. In: J.J. Schultz, ed. *Phosphate fertilizers and the environment*, pp. 89–95. Muscle Shoals, Estados Unidos de América, IFDC.
- Hellums, D.T. 1995a. Phosphorus and its role in crop production in Asia. In: K. Dahanayake, S.J. Van Kauwenbergh y D.T. Hellums, eds. *Direct application of phosphate rock and appropriate technology fertilizers in Asia: what hinders acceptance and growth*, pp. 9–14. Kandy, Sri Lanka, Institute of Fundamental Studies and Muscle Shoals, Estados Unidos de América, IFDC.
- Hellums, D.T. 1995b. Environmental aspects of phosphate fertilizer production and use. In: K. Dahanayake, S.J. Van Kauwenbergh y D.T. Hellums, eds. *Direct application of phosphate rock and appropriate technology fertilizers in Asia: what hinders acceptance and growth*, pp. 105–114. Kandy, Sri Lanka, Institute of Fundamental Studies and Muscle Shoals, Estados Unidos de América, IFDC.
- Hellums, D.T., Baanante, C.A. y Chien, S.H. 1992. Alternative phosphorus fertilizers for the tropics: an agronomic and economic evaluation. In S. Balas, ed. *Proceedings of the tropsoils phosphorus decision support system workshop*, pp. 147–154. Raleigh, Estados Unidos de América, Tropical Soils 92–01.
- Hellums, D.T., Chien, S.H. y Touchton, J.T. 1989. Potential agronomic value of calcium in some phosphate rocks from South America and West Africa. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 53: 459–462.
- Helyar, K.R. 1998. Efficiency of nutrient utilization and sustaining soil fertility with particular reference to phosphorus. *Field Crops Res.*, 56: 187–195.
- Henaou, J. y Baanante, C.A. 1999. *An evaluation of strategies to use indigenous and imported sources of phosphorus to improve soil fertility and land productivity in Mali*. Technical Bulletin IFDC-T-49. Muscle Shoals, Estados Unidos de América, IFDC. 75 pp.
- Heng, L.K. 2000. Modelling, database and the P submodel. In: IAEA, ed. *Management and conservation of tropical acid soils for sustainable crop production*, pp. 101–111. IAEA-TECDOC-1159. Viena, IAEA.
- Heng, L.K. 2003. Towards developing a decision support system for phosphate rock direct application in agriculture. In: S.S.S. Rajan y S.H. Chien, eds. *Direct application of phosphate rock and related technology: latest developments and practical experiences*. Proc. Int. Meeting, Kuala Lumpur, 16–20 July 2001. Muscle Shoals, Estados Unidos de América, IFDC. 441 pp.
- Hien, V., Kaboré, D., Youl, S. y Löwenberg de Boer, J. 1997. Stochastic dominance analysis of on-farm trial data: the riskiness of alternative phosphate sources in Burkina Faso. *Ag. Econ.*, 15(3): 213–221.

- Hinsinger, P. 1998. How do plant roots acquire mineral nutrients? *Adv. Agron.*, 64: 225–265.
- Hinsinger, P. y Gilkes, R.J. 1995. Root-induced dissolution of phosphate rock in the rhizosphere of lupins grown in alkaline soil. *Aus. J. Soil. Res.*, 33: 477–489.
- Hinsinger, P. y Gilkes, R.J. 1997. Dissolution of phosphate rock in the rhizosphere of five plant species grown in an acid, P-fixing substrate. *Geoderma*, 75: 231–249.
- Hocking, P.J. 2001. Organic acids exuded from roots in phosphorus uptake and aluminum tolerance of plants in acid soils. *Adv. Agron.*, 74: 63–93.
- Hocking, P.J., Keerthisinghe, G., Smith, F.W. y Randall, P.J. 1997. Comparison of the ability of different crop species to access poorly-available soil phosphorus. In: T. Ando, K. Fujita, K.H. Matsumoto, S. Mori & J. Sekiya, eds. *Plant nutrition for sustainable food production and agriculture*, pp. 305–308. Dordrecht, Países Bajos, Kluwer Academic Publishers.
- Hocking, P.J., Randall, P., Delhaize, E. y Keerthisinghe, G. 2000. The role of organic acids exuded from roots in phosphorus nutrition and aluminum tolerance in acidic soils. In: IAEA, ed. *Management and conservation of tropical acid soils for sustainable crop production*, pp. 61–73. IAEA-TECDOC- 1159. IAEA, Viena.
- Hoffland, E. 1992. Quantitative evaluation of the role of organic acid exudation in the mobilization of rock phosphate by rape. *Plant Soil*, 140: 279–289.
- Hoffland, E., Findenegg, G.R. y Nelemans, J.A. 1989. Solubilization of rock phosphate by rape. II. Local root exudation of organic acids as a response to P-starvation. *Plant Soil*, 113: 161–165.
- Horst, W.J y Waschkies, C. 1987. Phosphorus nutrition of spring wheat in mixed culture with white lupin. *Z. Pflanz. Bodenk.*, 150: 1–8.
- Howeler, R.H. y Woodruff, C.M. 1968. Dissolution and availability to plants of rock phosphates of igneous and sedimentary origins. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 32: 79–82.
- Hu, H.Q., Li, X.Y., Liu, J.F., Liu, F.L., Xu, L. y Liu, F. 1997. The effect of direct application of phosphate rock on increasing crop yield and improving properties of red soil. *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, 46: 235–239.
- Hulse, J.H. 1995. *Science, agriculture and food security*. Ottawa, NRC Research Press.
- IAEA. 2000. *Management and conservation of tropical acid soils for sustainable crop production*. Proceedings of a consultants meeting, 1–3 March 1999. IAEA-TECDOC-1159. Viena.
- IAEA. 2002. *Assessment of soil phosphorus status and management of phosphatic fertilizers to optimize crop production*. IAEA-TECDOC-1272. Viena. (también disponible en CD ROM).
- IFDC. 1996. *Pilot plant test to produce granular partially acidulated phosphate rock products by the single step acidulation granulated process using Riecito phosphate rock*. Final Report. Muscle Shoals, Estados Unidos de América.
- IFDC. 2003. *Direct application of phosphate rock and related technology: latest experiences and practical experiences*, S.S.S. Rajan y S.H. Chien, eds. Proc. Int. Meeting, Kuala Lumpur, 16–20 July 2001. Muscle Shoals, Estados Unidos de América, International Fertilizer Development Center. 441 pp.
- IFDC-CIRAD-ICRAF-NORAGRIC. 1996. An assessment of phosphate rock as a capital investment: evidence from Burkina Faso, Madagascar, Zimbabwe. Washington, DC, World Bank. 23 pp.
- Illmer, P. y Scinner, F. 1995. Solubilization of inorganic calcium phosphates – solubilisation mechanisms. *Soil Biol. Biochem.*, 27: 257–263.
- Illmer, P., Barbato, A. y Scinner, F. 1995. Solubilization of hardly-soluble AlPO<sub>4</sub> with P solubilising microorganisms. *Soil Biol. Biochem.*, 27: 265–270.
- IMPHOS. 1983. *Third international congress on phosphorus compounds*. Proc. Congress, 4–6 October 1983, Bruselas. 656 pp.
- IMPHOS. 1992. *Fourth international IMPHOS conference*. Proc. Int. Conf., Ghent, Bélgica. 758 pp.
- Iretskaya, S.N. y Chien, S.H. 1999. Comparison of cadmium uptake by five different food grain crops grown on three soils varying in pH. *Com. Soil Sci. Plant Anal.*, 30: 441–448.

- Iretskaya, S.N., Chien, S.H. y Menon, R.G. 1998. Effect of acidulation of high cadmium containing phosphate rocks on cadmium uptake by upland rice. *Plant Soil*, 201:183–188.
- Ishikawa, S., Wagatsuma, T., Sasaki, R. y Ofei-Manu, P. 2000. Comparison of the amount of citric and malic acids in Al media of seven plant species and two cultivars each in five plant species. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 46: 751–758.
- Jadin, P. y Truong, B. 1987. Efficacité de deux phosphates naturels tricalciques dans deux sols ferrallitiques acides du Gabon. *Café Cacao Thé*, Vol. XXXI, no. 4: 291–302.
- Jaggi, T.N. 1986. Potentiality of using ground rock phosphates as phosphatic fertilizers in Indian soils. In: G.V. Kothandaraman, T.S. Manickam y K. Natarajan, eds. *Rock phosphate in agriculture*, pp 1–14. Coimbatore, India, Tamil Nadu Agricultural University.
- Jama, B., Swinkels, A. y Buresh, R.J. 1997. Agronomic and economic evaluations of organic and inorganic phosphorus in western Kenya. *Agron. J.*, 89: 597–604.
- Johnston, A.E y Syers, J.K., eds. 1996. *Nutrient management for sustainable food production in Asia*. Proc. Int. Conf. IMPHOS-AARD/CSAR. Wallingford, Reino Unido, CAB International.
- Johnston, H.W. 1954a. The solubilization of “insoluble” phosphate. II – A quantitative and comparative study of the action of selected aliphatic acids on tricalcium phosphate. *N. Z. J. Sci. Tech. B.*, 36: 49–55.
- Johnston, H.W. 1954b. The solubilization of “insoluble” phosphate. III – A quantitative and comparative study of the action of chosen aromatic acids on tricalcium phosphate. *N. Z. J. Sci. Tech. B.*, 36: 281–284.
- Johnstone, P.D. y Sinclair, A.G. 1991. Replication requirements in field experiments for comparing phosphate fertilizers. *Fert. Res.*, 29: 329–333.
- Jones, D.L. 1998. Organic acids in the rhizosphere – a critical review. *Plant Soil*, 205: 25–44.
- Jones, M.D., Duraql, D.M. y Tinker, P.B. 1998. A comparison of arbuscular and ectomycorrhizal *Eucalyptus coccifera*: growth response, phosphorus uptake efficiency, and external hyphal production. *New Phyt.*, 140: 125–134.
- Kamh, M., Horst, W.J., Amer, F., Mostafa, H. y Maier, P. 1999. Mobilization of soil and fertilizer phosphate by cover crops. *Plant Soil*, 211: 19–27.
- Kamprath, E.J. 1970. Exchangeable aluminum as a criterion for liming leached mineral soils. *Soil. Sci. Soc. Am. Proc.*, 34: 252–254.
- Kanabo, I. y Gilkes, R.J. 1987. The role of soil pH in the dissolution of phosphate rock fertilizers. *Fert. Res.*, 12: 165–174.
- Keerthisinghe, G., Zapata, F., Chalk, P.M. y Hocking, P. 2001. Integrated approach for improved P nutrition of plants in tropical acid soils. In: W.J. Horst, M.K. Schenk, A. Bürkert, N. Classen, H. Flessa, W.B. Frommer, H. Goldbach, H.W. Olf, V. Römheld, B. Sattelmacher, U. Schmidhalter, S. Schubert, N. v. Wieren y L. Wittenmayer, eds. *Food security and sustainability of agro-ecosystems through basic and applied research*, pp. 974–975. Proceedings of the XIV International Plant Nutrition Colloquium. Dordrecht, Países Bajos, Kluwer Academic Publishers.
- Khasawneh, F.E. y Doll, E.C. 1978. The use of phosphate rock for direct application to soils. *Adv. Agron.*, 30: 159–206.
- Kirk, G.J.D. y Nye, P.H. 1985a. The dissolution and dispersion of dicalcium phosphate dihydrate in soils. I. A predictive model for a planar source. *J. Soil Sci.*, 36: 445–459.
- Kirk, G.J.D. y Nye, P.H. 1985b. The dissolution and dispersion of dicalcium phosphate dihydrate in soils. II. Experimental evaluation of the model. *J. Soil Sci.*, 36: 461–468.
- Kirk, G.J.D. y Nye, P.H. 1986. The dissolution and dispersion of dicalcium phosphate dihydrate in soils. III. A predictive model for regularly distributed particles. *J. Soil Sci.*, 37: 511–524.
- Kittams, H.A. y Attoe, O.J. 1965. Availability of phosphorus in rock phosphate-sulphur fusions. *Agron. J.*, 57: 331–334
- Klockner Industrie Anlagen GMBH. 1968. Etude économique et technique en vue de l'exploitation d'un gisement de phosphates dans la région de Bourem, Mali. Bamako, Dir. Nat. Geol. Mines. 63 pp.



- Kpomblekou, K. y Tabatabai, M.A. 1994a. Effect of organic acids on release of phosphorus from phosphate rocks. *J Soil Sci.*, 158: 442–453.
- Kpomblekou, K. y Tabatabai, M.A. 1994b. Metal content of phosphate rocks. *Com. Soil Sci. Soc. Plant Anal.*, 25: 2871–2882.
- Kpomblekou, K, Chien, S.H., Henaou, J. y Hill, W.A. 1991. Greenhouse evaluation of phosphate fertilizers produced from Togo phosphate rock. *Com. Soil Sci. Plant Anal.*, 22: 63–73.
- Kucey, R.M.N., Janzen, H.H. y Leggett, M.E. 1989. Microbially mediated increases in plant-available phosphorus. *Adv. Agron.*, 42: 199–228.
- Kuyvenhoven, A., Becht, J.A. y Ruben, R. 1998a. Critères économiques d'un investissement public dans l'amélioration du sol en Afrique de l'Ouest: prévisions d'utilisations du phosphate naturel pour l'amélioration de la fertilité du sol. *In: H. Breman & K. Sissoko, eds. Intensification agricole du Sahel*, pp. 895–916. Paris, Karthala.
- Kuyvenhoven, A., Becht, J.A. y Ruben, R. 1998b. Financial and economic evaluation of phosphate rock use to enhance soil fertility in West Africa: is there a role for government? *In: G.A.A. Wossink, G.C. Van Kooten y G.H. Peters, eds. Economics of agro-chemicals*, pp. 249–261. Aldershot, Reino Unido, Ashgate.
- Kuyvenhoven, A., Ruben, R. y Kruseman, G. 1998c. Technology, market policies and institutional reform for sustainable land use in southern Mali. *Ag. Econ.*, 19: 53–62.
- Lal, R. 1990. Tropical soils: distribution, properties and management. *Res. Man. Opt.*, 7: 39–52.
- Lal, R. 1999. Soil management and restoration for C sequestration to mitigate the accelerated greenhouse effect. *Prog. Env. Sci.*, 1: 307–326.
- Lal, R. 2000. Soil management in the developing countries. *Soil Sci.*, 165(1): 57–72.
- Lange Ness, R. y Vlek, P.L.G. 2000. Mechanism of calcium and phosphate release from hydroxy-apatite by mycorrhizal hyphae. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64: 949–955.
- Larsen, S. 1952. The use of <sup>32</sup>P in studies of the uptake of phosphorus by plants. *Plant Soil*, 4: 1–10.
- Ledgard, S.F., Thorrold, B.S., Sinclair, A.G., Rajan, S.S.S. y Edmeades, E.C. 1992. Summary of MAF field trials with 'Longlife' phosphatic fertilizers. *Proc. N. Z. Grass. Ass.*, 54: 35–40.
- Lehr, J.R. y McClellan, G.H. 1972. *A revised laboratory reactivity scale for evaluating phosphate rocks for direct application*. Bulletin Y-43. Muscle Shoals, Estados Unidos de América, Tennessee Valley Authority.
- Lenglen, M. 1935. *La question de l'emploi direct des phosphates minéraux naturels*. Paris, Syndicat National des Engrais Chimiques. 46 p.
- León, L.A., Fenster, W.E. y Hammond, L.L. 1986. Agronomic potential of eleven phosphate rocks from Brazil, Colombia, Peru, and Venezuela. *Soil Sc. Soc. Am. J.*, 50(3): 798–802.
- Ling, A.H., Harding, P.E. y Ranganathan, V. 1990. Phosphorus requirements and management of tea, coffee and cocoa. *In: IRRI, ed. Phosphorus requirements for sustainable agriculture in Asia and Oceania*, pp. 383–398. Manila, IRRI.
- Loganathan, P., Hedley, M.J. y Bretherton, M.R. 1994. The agronomic value of co-granulated Christmas Island grade C phosphate rock and elemental sulphur. *Fert. Res.*, 39: 229–237.
- Lompo, F., Sedogo, M.P. y Hien, V. 1995. Agronomic impact of Burkina phosphate and dolomite limestone. *In: H. Gerner y A.U. Mokwunye, eds. Use of phosphate rock for sustainable agriculture in West Africa*, pp. 54–66. Miscellaneous Fertilizer Studies No. 11. Muscle Shoals, Estados Unidos de América, IFDC, Africa.
- Lopes, A. 1998. The use of phosphate rocks to build up soil P and increase food production in acid soils: the Brazilian experience. *In: A.E. Johnston y J.K. Syers, eds. Nutrient management for sustainable food production in Asia*, pp. 121–132. Proc. IMPHOS-AARD/CSAR. Wallingford, Reino Unido, CAB International.
- Mackay, A.D. y Syers, J.K. 1986. Effect of phosphate, calcium, and pH on the dissolution of a phosphate rock in soil. *Fert. Res.*, 10: 175–184.
- Mackay, A.D., Syers, J.K. y Gregg, P.E.H. 1984. Ability of chemical extraction procedures to assess the agronomic effectiveness of phosphate rock materials. *N. Z. J. Agric. Res.*, 27: 219–230.

- Maene, L.M.** 2003. Direct application of phosphate rock: a global perspective of the past, present, and future. *In: S.S.S. Rajan y S.H. Chien, eds. Direct application of phosphate rock and related technology: latest developments and practical experiences.* Proc. Int. Meeting, Kuala Lumpur, 16–20 July 2001. Muscle Shoals, Estados Unidos de América, IFDC. 441 pp.
- Mahimairaja, S., Bolan, N.S. y Hedley, M.J.** 1995. Dissolution of phosphate rock during the composting of poultry manure: an incubation experiment. *Fert. Res.*, 40: 93–104.
- Malaysian Standard.** 1998. *Specification for ground phosphate rock, agricultural grade (second revision), MS46: 1998.* Selangor DE, Malaysia, Department of Standards.
- Manickam, T.S.** 1993. Organics in soil fertility and productivity management. *In: P.K. Thampan, ed. Organics in soil health and crop production*, pp. 87–104. Cochin, India, Peekay Tree Crops Developments Foundation.
- Manjunath, A. y Habte, M.** 1992. External and internal P requirements of plant species differing in their mycorrhizal dependency. *A. Soil Res. Rehab.* 6: 271–284.
- Marschner, H.** 1993. *Mineral nutrition of higher plants.* Londres, Academic Press Ltd., Harcourt Brace y Co. Publishers.
- Matthews, R., Stephens, W., Hess, T., Middleton, T. y Graves, A.** 2002. Applications of crop/soil simulation models in tropical agricultural systems. *Adv. Agron.*, 76: 31–124.
- McClellan, G.H.** 1980. Mineralogy of carbonate fluorapatites. *J. Geol. Soc.*, 6: 675–681.
- McClellan, G.H. y Gremillion, L.R.** 1980. Evaluation of phosphatic raw materials. *In: F.E. Khasawneh, ed. The role of phosphorus in agriculture*, pp. 43–80. Madison, Estados Unidos de América, ASA-SSSA.
- McClellan, G.H. y Lehr, J.R.** 1969. Crystal chemical investigation of natural apatites. *Am. Min.*, 54: 1374–1391.
- McClellan, G.H. y Notholt, A.F.G.** 1986. Phosphate deposits of tropical sub-Saharan Africa. *In: A.E. Mokwunye y P.L.G. Vlek, eds. Management of nitrogen and phosphorus fertilizers in sub-Saharan Africa*, pp. 173–224. Developments in Plant and Soil Sciences 24. Dordrecht, Países Bajos, Kluwer Academic Publishers.
- McClellan, G.H. y Van Kauwenbergh, S.J.** 1990a. Mineralogy of sedimentary apatites. *In: A.J.G. Notholt y I. Jarvis, eds. Phosphorite research and development.* Geological Society Special Publication 52: 23–31.
- McClellan, G.H. y Van Kauwenbergh, S.J.** 1990b. Relationship of mineralogy to sedimentary phosphate rock reactivity. *In: A.T. Bachik y A. Bidin, eds. Proceedings of the workshop on phosphate sources for acid soils in the humid tropics of Asia*, pp. 1–17. Kuala Lumpur, Malaysian Society of Soil Science.
- McClellan, G.H. y Van Kauwenbergh, S.J.** 1991. Mineralogical and chemical variation of francolites with geological time. *J. Geol. Soc.*, 148: 809–812.
- McConnell, D.** 1938. A structural investigation of the isomorphism of the apatite group. *Am. Min.*, 54: 1379–1391.
- McLaughlin, M.J., Simpson, P., Fleming, F., Stevens, D.P., Cozens, G. y Smart, M.K.** 1997. Effect of fertilizer type on cadmium and fluorine concentrations in clover herbage. *Aus. J. Exp. Ag.*, 37: 1019–1026.
- McLay, C.D., Rajan, S.S.S. y Liu, Q.** 2000. Agronomic effectiveness of partially acidulated phosphate rock fertilizers in an allophanic soil at near-neutral pH. *Com. Soil Sci. Plant Anal.*, 31: 423–435.
- Menge, J.A., Lembright, H. y Johnson, E.L.V.** 1977. Utilization of mycorrhizal fungi in citrus nurseries. *Proc. Int. Soc. Cit.*, 1: 129–132.
- Menon, R.G. y Chien, S.H.** 1990. Phosphorus availability to maize from partially acidulated phosphate rocks and phosphate rocks compacted with triple superphosphate. *Plant Soil*, 127: 123–128.
- Menon, R.G. y Chien, S.H.** 1995. Soil testing for available phosphorus in soils where phosphate rock based fertilizers are used. *Fert. Res.*, 41: 179–181.



- Menon, R.G. y Chien, S.H. 1996. *Compaction of phosphate rocks with soluble phosphates – an alternative technology to partial acidulation of phosphate rocks with low reactivity: IFDC's experience*. IFDC-T-44. Muscle Shoals, Estados Unidos de América, IFDC.
- Menon, R.G., Chien, S.H. y Chardon, W.J. 1997. Iron oxide-impregnated filter paper (Pi test): II. A review of its application. *Nut. Cyc. Agroecosys.*, 47: 7–18.
- Menon, R.G., Chien, S.H. y Hammond, L.L. 1989a. The Pi soil phosphorus test: a new approach to testing for soil phosphorus. IFDC Reference Manual R-7. Muscle Shoals, Estados Unidos de América, IFDC.
- Menon, R.G., Chien, S.H. y Hammond, L.L. 1990. Development and evaluation of the Pi soil test for plant-available phosphorus. *Com. Soil Sci. Plant Anal.*, 21: 1131–1150.
- Menon, R.G., Hammond, L.L. y Sissingh, H.A. 1989b. Determination of plant-available phosphorus by the iron hydroxide-impregnated paper (Pi) soil test. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53: 110–115.
- Metherell, A.K. y Perrott, K.W. 2003. An integrated decision support package for evaluation of reactive phosphate rock fertilizer strategies for grazed pasture. In: S.S.S. Rajan y S.H. Chien, eds. *Direct application of phosphate rock and related technology: latest developments and practical experiences*. Proc. Int. Meeting, Kuala Lumpur, 16–20 July 2001. Muscle Shoals, Estados Unidos de América, IFDC. 441 pp.
- Mew, M. 2000. Phosphate rock. In: *Metals and mineral annual review*, pp. 110–122. Londres, The Mining Journal Ltd.
- Mishra, B. 1975. Report on investigations on the utilization of Mussoorie rock phosphate for direct application to field crops. In PPCL, ed. *Mussoorie-phos, a phosphate fertilizer for direct application*. Dehradun, India, PPCL. 34 pp.
- Mishra, M.M. y Bangar, K.C. 1986. Rock phosphate composting: transformation of phosphorus forms and mechanisms of solubilization. *Bio. Ag. Hort.*, 3: 331–340.
- Miyasaka, C. y Habte, M. 2001. Plant mechanisms and mycorrhizal symbioses to increase phosphorus uptake efficiency. *Com. Soil Sci. Plant Anal.*, 32: 1101–1147.
- Moghimi, A. y Tate, M.E. 1978. Does 2-Ketogluconate chelate calcium in the pH range 2.4–6.4? *Soil Biol. Biochem.*, 10: 289–292.
- Mokwunye, A.E. y Vlek, P.L.G., eds. 1986. *Management of nitrogen and phosphorus fertilizers in sub-Saharan Africa*, pp. 173–224. Developments in Plant and Soil Sciences 24. Dordrecht, Países Bajos, Kluwer Academic Publishers.
- Montange, D. y Zapata, F. 2002. Standard characterization of soils employed in the FAO/IAEA phosphate project. In: IAEA, ed. *Assessment of soil phosphorus status and management of phosphatic fertilizers to optimise crop production*, pp. 24–43. IAEA TECDOC 1272. Viena, IAEA. 473 pp.
- Montenegro, A. y Zapata, F. 2002. Rape genotypic differences in P uptake and utilization from phosphate rocks in an andisol of Chile. *Nut. Cyc. Agroecosys.*, 63(1): 27–33.
- Moorby, H., White, R. y Nye, P. 1988. The influence of phosphate nutrition on H ion efflux from the roots of young rape plants. *Plant Soil*, 105: 247–256.
- Morel, C. y Fardeau, J.C. 1989. Native soil and fresh fertilizer phosphorus uptake as affected by rate of application and P fertilizers. *Plant Soil*, 115: 123–128.
- Mortvedt, J.J. y Sikora, F.J. 1992. Heavy metal, radionuclides, and fluorides in phosphorus fertilizers. In: F.J. Sikora, ed. *Future directions for agricultural phosphorus research*, pp. 69–73. TVA Bulletin Y-224. Muscle Shoals, Estados Unidos de América.
- Mosse, B., Stribley, D.P. y Le Tacon, F. 1981. Ecology of mycorrhizae and mycorrhizal fungi. *Adv. Micro. Ecol.*, 5: 137–210.
- Mostara, M.R. y Datta, N.P. 1971. Rock phosphate as a fertilizer for direct application in acid soils. *J. Ind. Soil Sci.*, 19: 107–113.
- Mugwira, L., Nyamangara, J. y Hikwa, D. 2002. Effect of manure and fertilizer on maize at a research station and in a smallholder (peasant) area of Zimbabwe. *Plant Soil*, 33: 379–402.
- Murdoch, C.L., Jacobs, J.A. y Gerdemann, J.W. 1967. Utilization of phosphorus sources of different availability by mycorrhizal and non-mycorrhizal maize. *Plant Soil*, 27: 329–338.

- Nakamaru, Y., Nanzyo, M. y Yamasaki, S. 2000. Utilization of apatite in fresh volcanic ash by pigeonpea and chickpea. *Soil Sci. Plant Nut.*, 46: 591–600.
- Nelson, W.L., Mehlich, A. y Winters, E. 1953. The development, evaluation, and use of soil tests for phosphorus availability. *Agron. J.*, 4: 153–158.
- Netherlands Economic Institute (NEI). 1998. *Opérationnalisation d'un programme d'utilisation du Burkina phosphate*. Restricted circulation. Rotterdam, Países Bajos.
- Nordengren, S. 1957. New theories of phosphate reactions in the soil. *Fert. Feed. Stuffs J.*, 47: 344–353.
- Notholt, A.J.G., Sheldon, R.P. y Davidson, D.F., eds. 1989. *Phosphate deposits of the world, Vol. 2: phosphate rock resources*. Cambridge, Reino Unido, University Press Cambridge.
- Official Journal of the European Communities. 1976. N° L24, 30.1.76, p.29.
- Oldeman, L.R. 1994. The global extent of soil degradation. In: D.J. Greenland y I. Szabolcs, eds. *Soil resilience and sustainable land use*, pp. 99–118. Wallingford, Reino Unido, CAB International.
- Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F.S. y Dean, L.A. 1954. *Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate*. USDA Circ. 939.
- Ortas, I., Harris, P.J. y Rowell, D.L. 1996. Enhanced uptake of phosphorus by mycorrhizal sorghum plants as influenced by forms of nitrogen. *Plant Soil*, 184: 255–264.
- Ortas, I., Ortakci, D. y Kaya, Z. 2002. Various mycorrhizal fungi propagated on different hosts have different effect on citrus growth and nutrient uptake. *Com. Soil Sci. Plant Anal.*, 33: 259–272.
- Owusu-Bennoah, E., Zapata, F. y Fardeau, J.C. 2002. Comparison of greenhouse and P isotopic laboratory methods for evaluating the agronomic effectiveness of natural and modified rock phosphates in some acid soils of Ghana. *Nut. Cyc. Agroecosys.*, 63(1): 1–12.
- Pairunan, A.K., Robson, A.D. y Abbott, L.K. 1980. The effectiveness of vesicular-arbuscular mycorrhizae in increasing growth and phosphorus uptake of subterranean clover from phosphorus sources of different solubilities. *New Phyt.*, 84: 327–338.
- Palaniappan, S.P. y Natarajan, K. 1993. Practical aspects of organic matter maintenance in soil. In: P.K. Thampan, ed. *Organics in soil health and crop production*, pp. 24–41. Cochin, India, Peekay Tree Crops Development Foundation.
- Pearson, R.W. 1975. *Soil acidity and liming in the humid tropics*. Cornell International Agriculture Bulletin 30. Ithaca, New York, Estados Unidos de América, Cornell University. 66 pp.
- Perrott, K. 2003. Direct application of phosphate rocks to pastoral soils – phosphate rock reactivity and the influence of soil and climatic factors. In: S.S.S. Rajan y S.H. Chien, eds. *Direct application of phosphate rock and related technology: latest developments and practical experiences*. Proc. Int. Meeting, Kuala Lumpur, 16–20 July 2001. Muscle Shoals, Estados Unidos de América, IFDC. 441 pp.
- Perrott, K.W. y Wise, R.G. 2000. Determination of residual reactive phosphate rock in soil. *Com. Soil Sci. Plant Anal.*, 31: 1809–1824.
- Perrott, K.W., Sagar, S. y Menon, R.G. 1993. Evaluation of soil phosphate status where phosphate rock based fertilizers have been used. *Fert. Res.*, 35: 67–82.
- Perrott, K.W., Kerr, B.E., Watkinson, J.H. y Waller, J.E. 1996. Phosphorus status of pastoral soils where reactive phosphate rock fertilizers have been used. *Proc. N. Z. Grass Ass.*, 57: 133–137.
- Pessaraki, M., ed. 1999. *Handbook of plant and crop stress*. New York, Estados Unidos de América, Marcel Dekker Inc. 1254 pp.
- Pohlman, A.A. y McColl, G.J. 1986. Kinetics of metal dissolution from forest soils by organic acids. *J. Env. Qual.*, 15: 86–92.
- Poojari, B.T., Krishnappa, K.M., Sharma, K.M.S., Jayakumar, B.V. y Panchaksharaiah, S. 1988. Efficiency of rock phosphate as a source of phosphorus in rice-groundnut cropping system in coastal Karnataka. In: *Seminar proceedings on the use of rock phosphate in west coast soils*, pp. 58–63. Bangalore, India, University of Agricultural Sciences.

- Pushparajah, E., Cnah, F. y Magat, S.S. 1990. Phosphorus requirements and management of oil palm, coconut and rubber. *In: IRRI, ed. Phosphorus requirements for sustainable agriculture in Asia and Oceania*, pp. 399–425. Manila, IRRI.
- Pyrites, Phosphates and Chemicals Ltd. (PPCL). 1980. *Mussoorie phosphorite as straight phosphatic fertilizer*. Dehradun, India.
- Pyrites, Phosphates and Chemicals Ltd. (PPCL). 1982. *Mussoorie-phos, a phosphate fertilizer for direct application*. Mussoorie Phosphorite Project. Dehradun, India.
- Pyrites, Phosphates and Chemicals Ltd. (PPCL). 1983. *Research on Mussoorie phosphate rock*. Technical Bulletin N° 1. New Delhi.
- Quin, B.F. y Scott, P. 2003. Development of the market for direct application phosphate rock a perspective based on experience in New Zealand and Scotland. *In: S.S.S. Rajan y S.H. Chien, eds. Direct application of phosphate rock and related technology: latest developments and practical experiences*. Proc. Int. Meeting, Kuala Lumpur, 16–20 July 2001. Muscle Shoals, Estados Unidos de América, IFDC. 441 pp.
- Rajan S.S.S. 1973. Phosphorus adsorption characteristics of Hawaiian soils and their relationships to equilibrium concentrations required for maximum growth of millet. *Plant Soil*, 39: 519–532.
- Rajan, S.S.S. 1982a. Availability to plants of phosphate from “biosupers” and partially acidulated phosphate rock. *N. Z. J. Ag. Res.*, 25: 355–361.
- Rajan, S.S.S. 1982b. Influence of phosphate rock reactivity and granule size on the effectiveness of “biosuper”. *Fert. Res.*, 3: 3–12.
- Rajan, S.S.S. 1983. Effect of sulphur content of phosphate rock/sulphur granules on the availability of phosphate to plants. *Fert. Res.*, 4: 287–296.
- Rajan, S.S.S. 1987. Phosphate rock and phosphate rock/sulphur granules as phosphate fertilizers and their dissolution in soil. *Fert. Res.*, 11: 43–60.
- Rajan, S.S.S. 2002. Comparison of phosphate fertilizers for pasture and their effect on soil solution phosphate. *Com. Soil Sci. Plant Anal.*, 33: 2227–2245.
- Rajan, S.S.S. y Ghani, A. 1997. Differential influence of soil pH on the availability of partially sulphuric and phosphoric acidulated phosphate rocks. II. Chemical and scanning electron microscopic studies. *Nut. Cyc. Agroecosys.*, 48: 171–178.
- Rajan, S.S.S. y Marwaha, B.C. 1993. Use of partially acidulated phosphate rocks as phosphate fertilisers. *Fert. Res.*, 35: 47–59.
- Rajan, S.S.S. y Watkinson, J.H. 1992. Unacidulated and partially acidulated phosphate rock: agronomic effectiveness and the rates of dissolution of phosphate rock. *Fert. Res.*, 33: 267–277.
- Rajan, S.S.S., Watkinson, J.H. y Sinclair, A.G. 1996. Phosphate rock for direct application to soils. *Ad. Agron.*, 57: 78–159.
- Rajan, S.S.S., Brown, M.W., Boyes, M.K. y Upsdell, M.P. 1992. Extractable phosphorus to predict agronomic effectiveness of ground and unground phosphate rocks. *Fert. Res.*, 32: 291–302.
- Rajan, S.S.S., Fox, R.L., Saunders, W.M.H. y Upsdell, M.P. 1991a. Influence of pH, time and rate of application on phosphate rock dissolution and availability to pastures. I. Agronomic benefits. *Fert. Res.*, 28: 85–93.
- Rajan, S.S.S., Fox, R.L., Saunders, W.M.H. y Upsdell, M.P. 1991b. Influence of pH, time and rate of application on phosphate rock dissolution and availability to pastures. II. Soil chemical studies. *Fert. Res.*, 28: 95–101.
- Rao, I.M., Friesen, D.K. y Osaki, M. 1999. Plant adaptation to phosphorus-limited tropical soils. *In: M. Pessarakli, ed. Handbook of plant and crop stress*, pp. 61–96. New York, Estados Unidos de América, Marcel Dekker Inc.
- Ratkowsky, D.A., Tennakoon, S.B., Sale, P.W.G. y Simpson, P.G. 1997. The use of substitution values for characterizing fertilizer performance. *Aus. J. Exp. Ag.* 37: 913–920.
- Ratsimbazafy, J.R. 1975. *Reconnaissance préliminaire des dépôts phosphatés des Iles Barren*. Doc. A.2223. Tananarive, Madagascar, Service Géologique de Madagascar.

- Rauniyar, G.P. y Goode, F.M. 1992. Technology adoption on small farms. *World Dev.*, 20(2): 275–282.
- RELARF. 1996. *Resúmenes de comunicaciones orales*. IV Reunión de la Red Latinoamericana de Roca Fosfórica, 3–5 julio 1996. La Habana.
- Robinson, J.S. y Syers, J.K. 1991. Effects of solution calcium concentration and calcium sink size on the dissolution of Gafsa phosphate rock in soils. *J. Soil Sci.*, 42: 389–397.
- Robinson, J.S., Syers, J.K. y Bolan, N.S. 1992. Importance of proton supply and calcium-sink size in the dissolution of phosphate rock materials of different reactivity in soil. *J. Soil Sci.*, 43: 447–459.
- Rodríguez, R. y Herrera, J. 2002. Field evaluation of partially acidulated phosphate rocks in a ferralsol from Cuba. *Nut. Cyc. Agroecosys.*, 63(1): 43–48.
- Rogers, E.M. 1983. *Diffusion of innovations*. New York, Estados Unidos de América, The Free Press.
- Rogers, H.T., Pearson, R.W. y Ensminger, L.E. 1953. Soil and fertilizer phosphorus in plant nutrition. New York, Estados Unidos de América, Academic Press.
- Rong, M. 1995. Phosphate rocks and fertilizers in China. *In*: K. Dahanayake, S.J. Van Kauwenbergh y D.T. Hellums, eds. *Direct application of phosphate rock and appropriate technology fertilizers in Asia – what hinders acceptance and growth*, pp. 187–189. Kandy, Sri Lanka, Institute of Fundamental Studies, and Muscle Shoals, Estados Unidos de América, IFDC.
- Saggar, S., Hedley, M.J. y White, R.E. 1990. A simplified resin membrane technique for extracting phosphorus from soils. *Fert. Res.*, 24: 173–180.
- Saggar, S., Hedley, M.J. y White, R.E. 1992a. Development and evaluation of an improved soil test for phosphorus: 1. The influence of phosphorus fertilizer solubility and soil properties on the extractability of soil P. *Fert. Res.*, 33: 81–91.
- Saggar, S., Hedley, M.J., White, R.E., Gregg, P.E., Perrott, K.W. y Comforth, I.S. 1992b. Development and evaluation of an improved soil test for phosphorus: 2. Comparing of the Olsen and mixed cation-anion exchange resin tests for predicting the yield of ryegrass grown in pots. *Fert. Res.*, 33: 135–144.
- Sale, P.W.G. y Mokuwunye, A.U. 1993. Use of phosphate rocks in the tropics. *Fert. Res.*, 35: 33–45.
- Sale, P.W.G., Simpson, P.G., Anderson, C.A. y Muir, L.L., eds. 1997a. The role of reactive phosphate rocks fertilizers for pastures in Australia. *Aus. J. Exp. Ag.*, 37: 845–1023. Reprint: Melbourne, Australia, CSIRO Publishing.
- Sale, P.W.G., Simpson, P.G., Lewis, D.C., Gilkes, R.J., Bolland, M.D.A., Ratkowsky, D.A., Gilbert, M.A., Garden, D.L., Cayley, J.W.D. y Johnson, D. 1997b. The agronomic effectiveness of reactive phosphate rocks: 1. Effect of the pasture environment. *Aus. J. Exp. Ag.*, 8: 921–936.
- Sánchez, P.A. y Buol, S.W. 1975. Soils of the tropics and the world food crisis. *Science*, 188: 598–603.
- Sánchez, P.A. y Salinas, J.G. 1981. Low-input technology for managing oxisols and ultisols in tropical America. *Adv. Agron.*, 34: 280–398.
- Sari, N., Ortas, I. y Yetisir, H. 2002. Effect of mycorrhiza inoculation on plant growth, yield, and phosphorus uptake in garlic under field conditions. *Com. Soil Sci. Plant Anal.*, 33: 2189–2201.
- Schnitzer, M. y Skinner, S.I.M. 1969. Free radicals in soil humic compounds. *Soil. Sci.*, 108: 383–388.
- Schultz, J. 1986. Sulphuric acid-based partially acidulated phosphate rock: its production cost and use. IFDC-T-31. Muscle Shoals, Estados Unidos de América, IFDC.
- Secilia, J. y Bagyaraj, D.J. 1992. Selection of efficient vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for wetland rice (*Oryza sativa* L). *Bio. Fert. Soils*, 13: 108–111.
- Sery, A. y Greaves, G.N. 1996. Chemical state of Cd in apatite phosphate ore as determined by EXAFS spectroscopy. *Am. Min.*, 81: 864–873.



- Shapiro, B.I. y Sanders, J.H. 1998. Fertilizer use in semi-arid West Africa: profitability and supporting policy. *Ag. Sys.*, 56(4): 467–482.
- Sheldon, R.P. 1987. Industrial minerals, with emphasis on phosphate rock. In: D.J. McLaren y B.J. Skinner, eds. *Resources and world development*, pp. 347–361. New York, Estados Unidos de América, John Wiley y Son Limited.
- Siddique, M., Ghonsikar, C.P. y Malewar, G.U. 1986. Studies on the use of Mussoorie rock phosphate in combination with some indigenous solubilising materials on calcareous soil. In: G.V. Kothandaraman, T.S. Manickam y K. Natarajan, eds. *Rock phosphate in agriculture*, pp. 142–149. Coimbatore, India, Tamil Nadu Agricultural University.
- Sikora, F.J. 2002. Evaluating and quantifying the liming potential of phosphate rocks. *Nut. Cyc. Agroecosys.*, 63(1): 59–67.
- Silverman, S.R., Fuyat, R.K. y Weiser, J.D. 1952. *Quantitative determination of calcite associated with carbonate-bearing apatites*, pp. 211–222. US Geological Survey.
- Simpson, P.G. 1997. *Reactive phosphate rocks: their potential role as P fertilizer for Australian pastures*. Technical Bulletin. Melbourne, Australia, La Trobe University.
- Sinclair, A.G., Shannon, P.W. y Risk, W.H. 1990. Sechura phosphate rock supplies plant-available molybdenum for pastures. *N. Z. J. Ag. Res.*, 33: 499–502.
- Sinclair, A.G., Johnstone, P.D., Smith, L.C., O'Connor, M.B. y Nguyen, L. 1993a. Comparison of six phosphate rocks and single superphosphate as phosphate fertilizers for clover-based pasture. *N. Z. J. Ag. Sci.*, 41: 415–420.
- Sinclair, A.G., Johnstone, P.D., Smith, L.C., O'Connor, M.B. y Nguyen, L. 1993b. Agronomy, modelling and economics of reactive phosphate rocks as slow-release phosphate fertilizers for grasslands. *Fert. Res.*, 36: 229–238.
- Sinclair, A.G., Johnstone, P.D., Smith, L.C., Risk, W.H., O'Connor, M.B., Roberts, A.H., Morton, J.D., Nguyen, L. y Shannon, P.W. 1993c. Effect of reactive phosphate rock on the pH of soil under pasture. *N. Z. J. Agric. Res.*, 36: 381–384.
- Singaram, P., Rajan, S.S.S. y Kothandaraman, G.V. 1995. Phosphate rock and a phosphate rock/ superphosphate mixture as fertilizers for crops grown on a calcareous soil. *Com. Soil Sci. Plant Anal.*, 26: 1571–1583.
- Singh, C.P. y Amberger, A. 1990. Humic substances in straw compost with rock phosphate. *Bio. Wastes*, 31: 165–174.
- Singh, C.P. y Amberger, A. 1991. Solubilization and availability of phosphorus during decomposition of rock phosphate enriched straw and urine. *Bio. Ag. Hort.*, 7: 261–269.
- Singh, S. y Kapoor, K.K. 1999. Inoculation with phosphate-solubilising microorganisms and a vesicular arbuscular mycorrhizal fungus improves dry matter yield and nutrient uptake by wheat grown in a sandy soil. *Bio. Fert. Soils*, 28: 139–144.
- Singh, U., Wilkens, P.W., Henao, J., Chien, S.H., Hellums, D.T. y Hammond, L.L. 2003. An expert system for estimating agronomic effectiveness of freshly applied phosphate rock. In: S.S.S. Rajan y S.H. Chien, eds. *Direct application of phosphate rock and related technology: latest developments and practical experiences*. Proc. Int. Meeting, Kuala Lumpur, 16–20 July 2001. Muscle Shoals, Estados Unidos de América, IFDC. 441 pp.
- Sissoko, K. 1998. *Et demain l'agriculture? Options techniques et mesures politiques pour un développement agricole durable en Afrique subsaharienne*. Documents sur la gestion des ressources tropicales. Wageningen, Países Bajos, Wageningen University.
- Smith, F.W. y Grava, J. 1958. Availability of phosphorus contained in phosphatic shale compared to that contained in monocalcium phosphate and raw rock phosphate. *Soil Sci.*, 86: 313–318.
- Smith, F.W., Ellis, B.G. y Grava, J. 1957. Use of acid-fluoride solutions for the extraction of available phosphorus in calcareous soils and in soils to which rock phosphate has been added. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 21: 400–404.
- Sprague, R.H. Jr y Carlson, E.H. 1982. *Building effective decision support systems*. Englewood Cliffs, Estados Unidos de América, Prentice-Hall Inc.
- Sri Adiningsih, J. y Nassir, A. 2001. *The potential for improving crop production on upland acid soils in Asia through the use of appropriate phosphate rocks*. Proceedings of the World

- Fertilizer Congress: Fertilization in the Third Millennium: Fertilizer, Food Security and Environmental Protection, 3–9 August 2001, Beijing.
- Srinivasan, T.N.** 1994. Foreign trade policies and India's development. *In: Agriculture and trade in China and India*, p. 177. San Francisco, Estados Unidos de América, International Centre for Economic Growth, ICS Press.
- Stevenson, F.J.** 1967. Organic acids in soil. *In: D.A. McLaren y G.H. Peterson, eds. Soil biochemistry*, pp. 119–146. New York, Estados Unidos de América, Marcel Dekker Inc.
- Stowasser, W.F.** 1991. Phosphate rock – analysis of the phosphate rock situation in the United States: 1990–2040. *Eng. Min. J.*, 192(9): 16CC-16II.
- Subba Rao, N.S.** 1982a. Biofertilizers. *In: N.S. Subba Rao, ed. Advances in agricultural microbiology*, pp. 219–242. Oxford and IBH, Reino Unido, Mohan Prilani, and New Delhi, India, Butterworth and Co.
- Subba Rao, N.S.** 1982b. Utilization of farm wastes and residues in agriculture. *In: N.S. Subba Rao, ed. Advances in agricultural microbiology*, pp. 509–522. Oxford and IBH, Reino Unido, Mohan Prilani, and New Delhi, India, Butterworth and Co.
- Swaby, R.J.** 1975. Biosuper – biological superphosphate. *In: K.D. McLachlan, ed. Sulphur in Australasian agriculture*, pp. 213–220. Sydney, Australia, Sydney University Press.
- Sylvia, D.M.** 1992. Demonstration and mechanism of improved phosphorus uptake by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *In: F.J. Sikora, ed. Future directions for agricultural phosphorus research*, pp. 31–34. Muscle Shoals, Estados Unidos de América, National Fertilizer and Environmental Research Centre, TVA.
- Tandon, H.L.S.** 1987. *Phosphorus: research and agricultural production in India*. Fertilizer Development and Consultation Organization. New Delhi, Greater Kailash 1.
- Tandon, H.L.S.** 1991. *Sulphur research and agricultural production in India*. Washington, DC, The Sulphur Institute. 88 pp.
- Teboh, J.F.** 1995. Phosphate rock as a soil amendment: who should bear the cost? *In: H. Gerner y A.U. Mokwunye, eds. Use of phosphate rock for sustainable agriculture in West Africa*, pp. 142–149. Lomé, IFDC Africa.
- Toro, M., Azcón, R. y Barea, J.M.** 1997. Improvement of arbuscular mycorrhiza development by inoculation of soil with phosphate-solubilising rhizobacteria to improve rock phosphate bioavailability ( $^{32}\text{P}$ ) and nutrient cycling. *App. Env. Microbiol.*, 63: 4408–4412.
- Truong, B.** 1986. *Synthèse des résultats des essais phosphates du Togo, bruts et partiellement attaqués, de 1983 à 1985*. Rapport de mission d'appui à la Direction de la Recherche Agronomique, Lomé. 22 pp.
- Truong, B. y Cisse, L.** 1985. Appréciation de la valeur fertilisante des phosphates de Matam (Sénégal). *Agron. Trop.*, 40(3): 230–238.
- Truong, B. y Fayard, C.** 1987. *Proposition d'une filière d'engrais au Burkina Faso à base de phosphates naturels de Kodjari, partiellement solubilisés*. Etude de faisabilité pour le Ministère de l'Agriculture et de l'Élevage (Burkina Faso) et le Ministère de la Coopération (France). 90 pp.
- Truong, B. y Fayard, C.** 1988. *Proposition d'une approche raisonnée pour la valorisation des phosphates naturels du Venezuela*. Rapport CIRAD-TECHNIFERT. 83 pp.
- Truong, B. y Fayard, C.** 1993. *Etude de prefaisabilité pour une production d'engrais au Mali à partir des phosphates de Tilemsi*. Rapport CIRAD-TECHNIFERT. Montpellier, France. 127 pp.
- Truong, B. y Fayard, C.** 1995. Small-scale fertilizer production units using raw and partially solubilized phosphate. *In: H. Gerner y A.U. Mokwunye, eds. Use of phosphate rock for sustainable agriculture in West Africa*, pp. 181–198. Miscellaneous Fertilizer Studies N° 11. Muscle Shoals, Alabama, Estados Unidos de América, IFDC Africa.
- Truong, B. y Montange, D.** 1998. The African experience with phosphate rock, including Djebel Onk, and case studies in Brazil and Vietnam. *In: A.E. Johnston y J.K. Syers, eds. Nutrient management for sustainable food production in Asia*, pp. 133–148. Proc. IMPHOS-AARD/CSAR. Wallingford, Reino Unido, CAB International.



- Truong, B. y Pichot, J.** 1976. Influence du phosphore des graines de la plante test sur la détermination du phosphore isotopiquement diluable (valeur L). *Agron. Trop.*, 31(11): 379–386.
- Truong, B. y Zapata, F.** 2002. Standard characterization of phosphate rock samples from the FAO/IAEA phosphate project. In: IAEA, ed. *Assessment of soil phosphorus status and management of phosphatic fertilizers to optimise crop production*, pp. 9–23. IAEA TECDOC. 1272. Viena, IAEA. 473 pp.
- Truong, B., Pichot, J. y Beunard, P.** 1978. Caracterisation et comparaison des phosphates naturels tricalciques d’Afrique de l’Ouest en vue de leur utilisation directe en agriculture. *Agron. Trop.*, 33: 136–145.
- Truong, B., Beunard, P., Diekola, K. y Pichot, J.** 1982. Caractérisation et comparaison des phosphates naturels de Madagascar en vue de leur utilisation en agriculture. *Agron. Trop.*, 37(1): 9–16.
- U.S. Bureau of Mines y U.S. Geological Survey.** 1981. *Principles of a resource/reserve classification for minerals*. U.S. Geological Survey Circular 831.
- U.S. Bureau of Mines.** 2001. *Mineral commodity summaries (1981–2001), phosphate rock*. Washington, DC, U.S. Department of the Interior.
- U.S. Geological Survey.** 1982. *Sedimentary phosphate resource classification system of the U.S. Bureau of Mines and the U.S. Geological Survey*. U.S. Geological Survey Circular 882.
- United Nations Environment Programme (UNEP).** 2000. *Global environment outlook 2000*. Londres, Earthscan Publications Ltd.
- United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) e IFDC.** 1998. *Fertilizer manual*. Dordrecht, Países Bajos, Kluwer Academic Publishers. 615 pp.
- Valencia, I., Pieri, C. y Hellums, D.T.** 1994. Rock phosphate as a capital investment in natural resource management. In: ISSS and MSSS, eds. *Trans. 15th World Congress Soil Science, Commission VI Symposia, Vol. 7a: 227–233*. Acapulco, México.
- Van der Paauw, F.** 1971. Effective water extraction method for the determination of plant available soil phosphorus. *Plant Soil*, 34: 467–481.
- Van der Zee, S.E.A.T., Fokking, L.G.J. y Van Riemsdijk, W.H.** 1987. A new technique for assessment of reversibly adsorbed phosphate. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51: 599–604.
- Van Kauwenbergh, S.J.** 1995. Mineralogy and characterization of phosphate rock. In: K. Dahanayake, S.J. Van Kauwenbergh y D.T. Hellums, eds. *Direct application of phosphate rock and appropriate technology fertilizers in Asia – what hinders acceptance and growth*, pp. 29–47. Kandy, Sri Lanka, Institute of Fundamental Studies.
- Van Kauwenbergh, S.J.** 1997. *Cadmium and other minor elements in world resources of phosphate rock*. Proceedings N° 400. Londres, The Fertilizer Society.
- Van Kauwenbergh, S.J.** 2003. Overview of world phosphate rock production. In: S.S.S. Rajan y S.H. Chien, eds. *Direct application of phosphate rock and related technology: latest developments and practical experiences*. Proc. Int. Meeting, Kuala Lumpur, 16–20 July 2001. Muscle Shoals, Estados Unidos de América, IFDC. 441 pp.
- Van Kauwenbergh, S.J. y Hellums, D.T.** 1995. Direct application phosphate rock: a contemporary snapshot. *Phos. Pot.*, 200: 27–37.
- Van Kauwenbergh, S.J. y McClellan, G.H.** 1990a. Mineralogy of sedimentary apatites and the relationship to phosphate rock reactivity. In: Proc. National Workshop on Fertilizer Efficiency, Cisarua, Indonesia. 29 pp.
- Van Kauwenbergh, S.J. y McClellan, G.H.** 1990b. Comparative geology and mineralogy of the southeastern United States and Togo phosphorites. In: A.J.G. Notholt & I. Jarvis, eds. *Phosphorite research and development*, pp. 139–155. Geological Society Special Publication N° 52.
- Vanlauwe, B., Nwoke, O.C., Diels, J., Sanginga, N., Carsky, R.J., Deckers, J. y Merckx, R.** 2000. Utilization of rock phosphate by crops on a representative sequence in Northern Guinea savanna zone of Nigeria: response by *Mucuna pruriens*, *Lablab purpureus* and maize. *Soil Bio. Bioch.*, 32: 2063–2077.

- Verma, L.N. 1993. Biofertiliser in agriculture. In: P.K. Thampan, ed. *Organics in soil health and crop production*, pp. 152–183. Cochin, India, Peekay Tree Crops Development Foundation.
- Von Uexkull, H.R. y Mutert, E. 1995. Global extent, development and economic impact of acid soils. In: R.A. Date, N.J. Grundon, G.E. Rayment y M.E. Probert, eds. *Plant-soil interactions at low pH: principles and management*. Development in Plant and Soil Sciences 64. Dordrecht, Países Bajos, Kluwer Academic Publishers. p 5–19.
- Wani, S.P. y Lee, K.K. 1992. Role of biofertilisers in upland crop production. In: H.L.S. Tandon, ed. *Fertilisers, organic manures, recyclable wastes and biofertilisers*, pp. 91–112. New Delhi, Fertiliser Development and Consultation Organization.
- Watkinson, J.H. 1994a. Modelling the dissolution of reactive phosphate rock in New Zealand pastoral soils. *Aus. J. Soil Res.*, 32: 739–53.
- Watkinson, J.H. 1994b. A test for phosphate rock reactivity in which solubility and size are combined in a dissolution rate function. *Fert. Res.*, 39: 205–215.
- Weil, R.R. 2000. Soil and plant influence on crop response to two African phosphate rocks. *Agron. J.*, 92: 1167–1175.
- Weil, S., Gregg, P.E.H. y Bolan, N.S. 1994. Influence of soil moisture on the dissolution of reactive phosphate rocks. In: L.D. Currie y P. Loganathan, eds. *The efficient use of fertilizers in a changing environment: reconciling productivity and sustainability*, pp. 75–81. Occasional Report N° 7. Palmerston North, New Zealand, Fertilizer and Lime Research Centre, Massey University.
- World Bank. 1994. *Feasibility of phosphate rock as a capital investment in sub-Saharan Africa: issues and opportunities*. Washington, DC.
- World Bank. 1997. *PR Initiative case studies: synthesis report. An assessment of phosphate rock as a capital investment: evidence from Burkina Faso, Madagascar, and Zimbabwe*. IFDC/CIRAD/ICRAF/ NORAGRIC. Washington, DC.
- Yost, R.S., Naderman, G.C., Kamprath, E.J. y Lobata, E. 1982. Availability of rock phosphate as measured by an acid-tolerant pasture grass and extractable phosphorus. *Agron. J.*, 74: 462–46.
- Young, C. 1990. Effect of phosphorus-solubilizing bacteria and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi on the growth of tree species in sub-tropical-tropical soils. *Soil Sci. Plant Nut.*, 36: 225–231.
- Yusdar, H. y Hanafi, M. 2003. Use of phosphate rock for perennial and annual crops cultivation in Malaysia: a review. In: S.S.S. Rajan y S.H. Chien, eds. *Direct application of phosphate rock and related technology: latest developments and practical experiences*. Proc. Int. Meeting, Kuala Lumpur, 16–20 July 2001. Muscle Shoals, Estados Unidos de América, IFDC. 441 pp.
- Zapata, F. 2000. Evaluating the agronomic effectiveness of phosphate rocks using nuclear and related techniques: results from a past FAO/IAEA Coordinated Research Project. In IAEA, ed. *Management and conservation of tropical acid soils for sustainable crop production*, pp. 91–100. IAEA-TECDOC- 1159. Viena, IAEA.
- Zapata, F. 2003. FAO/IAEA research activities on direct application of phosphate rocks for sustainable crop production. In: S.S.S. Rajan y S.H. Chien, eds. *Direct application of phosphate rock and related technology: latest developments and practical experiences*. Proc. Int. Meeting, Kuala Lumpur, 16–20 July 2001. Muscle Shoals, Estados Unidos de América, IFDC. 441 pp.
- Zapata, F., ed. 1995. Evaluation of the agronomic effectiveness of phosphate fertilizers through the use of nuclear and related techniques. Special issue. *Fert. Res.*, 41: 167–242.
- Zapata, F., ed. 2002. Utilisation of phosphate rocks to improve soil status for sustainable crop production in acid soils. Special issue. *Nut. Cyc. Agroecosys.*, 63(1):1–98.
- Zapata, F. y Axmann, H. 1995. <sup>32</sup>P isotopic techniques for evaluating the agronomic effectiveness of rock phosphate materials. *Fert. Res.*, 41: 189–195.
- Zapata, F. y Zaharah, A.R. 2002. Phosphorus availability from phosphate rock and sewage sludge as influenced by the addition of water-soluble phosphate fertilizer. *Nut. Cyc. Agroecosys.*, 63(1): 43–48.

- Zapata, F., Axmann, H. y Braun, H.** 1986. Agronomic evaluation of rock phosphate materials by means of radioisotope techniques. *In: ISSS y BG, eds. Trans. 13th Int. Cong. Soil Sci.*, Vol. III: 1012–1013. Hamburgo, Alemania.
- Zapata, F., Casanova, E., Salas, A.M. y Pino, I.** 1994. Dynamics of phosphorus in soils and phosphate fertilizer management in different cropping systems through the use of isotopic techniques. *In: ISSS y MSSS, eds. Trans. 15th World Congress Soil Sci., Commission IV Symposia*, Vol. 5a: 451–466. Acapulco, México.
- Zapata, F., Pino, I., Baherle, P. y Parada, A.M.** 1996. Estudio comparativo de la eficiencia de uso y absorción de fósforo a partir de fertilizantes fosfóricos por genotipos de trigo. *Terra*, 14: 325–330.

## CUADERNOS TÉCNICOS DE LA FAO

### BOLETINES DE FERTILIZANTES DE LA FAO

1. Fertilizer distribution and credit schemes for small-scale farmers, 1979 (I\* F)
2. Los niveles de producción agrícola y el empleo de fertilizantes, 1981 (I\* E F)
3. Maximizing the efficiency of fertilizer use by grain crops, 1980 (I E F)
4. Fertilizer procurement, 1981 (I F)
5. Fertilizer use under multiple cropping systems, 1983 (C\* I F)
6. Maximizing fertilizer use efficiency, 1983 (I\*)
7. Micronutrientes, 1983 (C\* E\* F I\*)
8. Manual on fertilizer distribution, 1985 (I\* F)
9. Guía de fertilizantes y nutrición vegetal, 1984 (Ar C\* E\* F\* I\*)
10. El uso eficaz de los fertilizantes en los suelos ácidos de las tierras altas de los trópicos húmedos, 1986 (E F I)
11. Uso eficaz de fertilizantes en las zonas con precipitaciones de verano, 1988 (E F I\*)
12. Integrated plant nutrition systems, 1995 (F I)
13. Utilización de las rocas fosfóricas para una agricultura sostenible, 2003 (E F I)
14. Assessment of soil nutrient balance – Approaches and methodologies, 2003 (F I)
15. Scaling soil nutrient balances – Enabling mesolevel applications for African realities, 2004 (F I)
16. Plant nutrition for food security – A guide for integrated nutrient management, 2006 (I)
17. Fertilizer use by crop, 2006 (I)

Disponibilidad: octubre de 2007

Ar – Arabe	Multil – Multilingüe
C – Chino	* Agotado
E – Español	** En preparación
F – Francés	
I – Inglés	
P – Portugués	

Los cuadernos técnicos de la FAO pueden obtenerse en los Puntos de venta autorizados de la FAO, o directamente solicitándolos al Grupo de Ventas y Comercialización, FAO, Viale delle Terme di Caracalla, 00153 Roma, Italia.

## Utilización de las rocas fosfóricas para una agricultura sostenible

Extensas investigaciones sobre el potencial agronómico y la efectividad de las rocas fosfóricas como fuente de fósforo han sido realizadas especialmente en África, Asia y América Latina y el Caribe. Existe una gran cantidad de información dispersa en informes y publicaciones de diversa índole. Este Boletín describe de manera detallada los tópicos principales relacionados con la utilización de las rocas fosfóricas en la agricultura, incluyendo los últimos resultados de la investigación sobre el tema y proporciona directivas para su empleo como roca fosfórica de aplicación directa a los suelos ácidos de las zonas tropicales y subtropicales. Los tópicos seleccionados son los siguientes: los depósitos de roca fosfórica en el mundo; la caracterización de las rocas fosfóricas; las metodologías de evaluación de las fuentes de roca fosfórica para la aplicación directa; un análisis de los factores biofísicos y de los factores de producción que afectan la efectividad agronómica de las rocas fosfóricas; un análisis de las condiciones socioeconómicas que influyen en la utilización y la adopción de las tecnologías relacionadas a la roca fosfórica como una inversión de capital para promover la intensificación agrícola; el desarrollo y la utilización de los sistemas de apoyo a la decisión para las rocas fosfóricas para aplicación directa; las tecnologías disponibles para aumentar la efectividad agronómica de las fuentes locales de roca fosfórica; los aspectos de medio ambiente; las directivas legales; y las áreas y las prioridades de la investigación futura.

