

ROCA FOSFÓRICA ACIDULADA COMO FUENTE DE FÓSFORO EN UN SUELO ÁCIDO CON O SIN ENCALADO

Armando Morillo¹, Omaira Sequera¹ y Ricardo Ramírez²

RESUMEN

La acidulación parcial de la roca fosfórica (RF) con ácido sulfúrico, ha sido usada con éxito para mejorar su solubilización e incrementar la eficiencia agronómica de esta fuente de P. Para comprobar la efectividad de la RF tratada con ácido sulfúrico y/o tiosulfato de amonio (TSA), se realizaron dos experimentos de invernadero con plantas de frijol cultivadas en potes. En el primer experimento se usó un suelo ácido (pH 3,3) deficiente en P mientras que en el segundo se usó el mismo suelo, encalado hasta pH 5,4. Las fuentes fosfatadas evaluadas fueron RF sin acidular, RF acidulada con ácido sulfúrico (RA), RF acidulada con una mezcla de 30 % de TSA y 70 % de ácido sulfúrico (R30T), RF acidulada con 100 % de TSA (R100T), y fosfato diamónico (FDA), además de un testigo sin tratar. Los tratamientos se distribuyeron en un diseño completamente aleatorizado con tres repeticiones. Después de 35 días de crecimiento del frijol se determinó la materia seca (MS), el P y Ca absorbido y el P y Ca residual en el suelo. La eficiencia de las fuentes de P en términos de incremento de MS y P absorbido siguió el orden, FDA>R30T=RA>RF=R100T, en ambos ensayos. Los tratamientos R30T y RA presentaron igual efectividad, y en vista de que en experiencias previas se obtuvo similar respuesta en plantas gramíneas, se concluye que R30T representa una alternativa de roca fosfórica parcialmente acidulada económica para ser usada en una amplia gama de cultivos de ciclo corto como el frijol.

Palabras clave adicionales: Eficiencia agronómica, frijol, tiosulfato de amonio

ABSTRACT

Acidulated phosphate rock as phosphorus source in limed and non-limed acid soils

Partial acidulation of the phosphate rock (PR) with sulfuric acid (SA) has been successfully used to improve its solubility and increment the agronomic effectiveness of this P source. To prove the efficiency of PR acidulated with SA and/or ammonium thiosulfate (ATS), two greenhouse experiments were conducted with potted cowpea plants grown on non-limed (pH 3,3) and limed soils (pH 5,4), low in P. The P sources evaluated were PR without acidulation, PR acidulated with 30 % ATS and 70 % SA (R30T), RF acidulated with ATS alone (R100T), PR acidulated with SA alone (RA), and diammonium phosphate (DAP), along with a non treated control. In each soil, the treatments were tested in a completely randomized design with three repetitions. After 35 d of crop growth the plants were harvested and the dry matter (DM), P and Ca uptake, and soil residual P and Ca were determined. The effectiveness of the P sources in terms of increasing DM and P uptake followed the order of DAP>R30T=RA>PR=R100T, in both soils. The treatments R30T and RA presented same effectiveness, and since in previous experiences similar results were found in gramineous plants, it is concluded that R30T represents an alternative of partially acidulated phosphate rock suitable for a wide range of annual crops.

Additional key words: Agronomic efficiency, cowpea, ammonium thiosulfate

INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas de los suelos ácidos es la deficiencia de fósforo (P). Para suplir las altas demandas de este nutriente se utilizan fertilizantes de costos cada vez más altos. La aplicación directa al suelo de roca fosfórica (RF) representa una alternativa que ha tomado importancia por su

costo más bajo y ha sido utilizada como fertilizante fosfatado por varias décadas, no sólo por su valor agronómico como fuente de P sino también como fuente de Ca para el cultivo (Adediran et al., 1998; Fernández y Ramírez, 2001). Sin embargo, la baja solubilidad de la RF no siempre garantiza resultados satisfactorios, especialmente cuando se usa en cultivos de ciclo

Recibido: Febrero 16, 2007

Aceptado: Noviembre 14, 2007

¹ Dpto. de Química y Suelos, Decanato de Agronomía, Universidad Centroccidental "Lisandro Alvarado". Apdo. 400. Barquisimeto, Venezuela. e-mail: osequera@ucla.edu.ve

² Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Apdo. 319. Maracay. Venezuela. e-mail: ricardosam@intercable.net.ve

corto (Pérez et al., 1995). Por esta razón, y tomando en cuenta los factores que afectan la solubilidad de la RF, se han realizado de experiencias para incrementar la solubilización de la RF y la disponibilidad del P para la planta. Como resultado de ello se han generado diferentes formas de rocas fosfóricas: micronizadas, aciduladas y compactadas, las cuales han sido evaluadas en su eficiencia agronómica en cultivos anuales y permanentes.

La acidulación parcial consiste en tratar la RF molida con una porción del ácido requerido para convertir totalmente el fosfato tricálcico insoluble en fosfato monocálcico, soluble en agua (Hammond et al., 1986). Varios ácidos pueden ser usados en este proceso (sulfúrico, fosfórico, nítrico, clorhídrico o combinación de ellos), aunque por razones económicas el ácido sulfúrico es, generalmente, el que se selecciona. Este proceso ha representado una alternativa tecnológica para mejorar el valor agronómico, de la RF a un costo más bajo que el requerido para fabricar el fertilizante convencional. Los resultados han sido satisfactorios, y a veces comparables a los obtenidos con fertilizantes solubles. Vera et al. (1988) estudiaron rocas fosfóricas venezolanas aciduladas, usando el maíz como cultivo indicador en un suelo ácido de Maturín. La roca fosfórica de Riecito (yacimiento del estado Falcón, Venezuela) acidulada al 40 % con ácido sulfúrico, produjo una efectividad agronómica comparable al superfosfato triple (SFT).

La eficiencia agronómica de los fosfatos producidos con diferentes grados de acidulación de las rocas fosfóricas de Monte Fresco y Riecito fue evaluada por Kadi et al. (1991) y los resultados indicaron que la RF de Riecito acidulada, constituye una alternativa válida como fuente de P para cultivos anuales. Casanova (1994) encontró que la eficiencia agronómica de la RF de Riecito parcialmente acidulada con ácido sulfúrico, fue comparable al SFT en los cultivos de sorgo y soya.

Ramírez (datos no publicados) observó la factibilidad de sustituir total o parcialmente el ácido sulfúrico, utilizado en la preparación de la roca parcialmente acidulada, por tiosulfato de amonio (TSA), lo que podría representar una reducción en los costos de producción del material acidulado. De igual forma, Sequera y Ramírez

(2003) estudiaron la acidulación parcial de la roca fosfórica con 70 % de ácido sulfúrico y 30 % de tiosulfato de amonio y encontraron que su efecto sobre plantas de maíz fue similar al producido cuando se usó sólo ácido sulfúrico, por lo que sugirieron la factibilidad de su producción industrial.

Por otro lado, es conocido que la tasa de disolución de la RF en el suelo, depende de la concentración de protones (H^+) alrededor de los gránulos de la RF. Es decir, que la disolución de la RF puede ser favorecida cuando el pH del suelo, el calcio intercambiable y la concentración de P son bajos. Por lo que, muchos suelos ácidos del trópico presentan condiciones favorables para la aplicación de la RF (Hammond et al., 1986; Robinson et al., 1992).

Dado que en el trabajo de Sequera y Ramírez (2003) se comprobó la efectividad del uso de RF en una planta gramínea (maíz), en este trabajo se trató de ratificar la efectividad de la roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico y TSA como fuente de P en una planta leguminosa (frijol), en un suelo ácido con y sin encalado.

MATERIALES Y MÉTODOS

El suelo usado para los experimento, fue colectado en la localidad de Villanueva, estado Lara, Venezuela. El análisis del suelo mostró un pH de 3,3, $7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de P, $246 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de Ca extraído con acetato de amonio, $2,4 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ de Al, 1,7 % de materia orgánica y textura franco-arcillosa.

Las fuentes de P usadas fueron, fosfato diamónico (FDA), roca fosfórica de Riecito, sin acidular (RF), RF acidulada al 50 % con 30 % de TSA y 70 % de H_2SO_4 (R30T), RF acidulada al 50 % con 100 % de TSA (R100T) y RF acidulada al 50 % con 100 % de H_2SO_4 (RA) y un tratamiento testigo sin aplicación de P (0P). Los tratamientos se distribuyeron en un diseño completamente aleatorizado con tres repeticiones, en condiciones controladas. El proceso de acidulación de las rocas fue realizado por el Instituto Tecnológico Venezolano de Petróleo (INTEVEP).

Las dosis de nutrimentos aplicadas al suelo fueron $200 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de P, $70 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de K como cloruro de potasio y $160 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de N, considerando en el cálculo el contenido de N del

TSA y completando con urea. No se hizo ningún ajuste para el azufre. Las dosis de P se calcularon tomando en cuenta el P_2O_5 total de cada fertilizante.

Se diseñaron dos experimentos, uno con suelo sin encalar y otro con suelo encalado, ajustando el pH a 5,4 con una caliza dolomítica (60,52 % $CaCO_3$ y 37,52 % $MgCO_3$), lo que produjo la disminución del Al a $0,02 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ y un aumento del Ca a $832 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Se pesaron 3 kg de suelo seco y tamizado en malla de 3 mm, se mezclaron con los fertilizantes antes señalados y se colocaron en pots plásticos con capacidad de 4 L. Los suelos se humedecieron con agua desmineralizada y se sembraron tres semillas de frijol (*Vigna unguiculata* L.) variedad Tuy. Los pots se colocaron en un invernadero enfriado con cortinas de agua, donde la temperatura máxima registrada fue $35,8^\circ\text{C}$ y la mínima de $22,2^\circ\text{C}$. A los siete días después de la siembra se realizó el entresaque dejando una planta por pote. El riego se realizó con agua desmineralizada, ajustando la humedad entre 50 y 75 % del agua aprovechable.

A los 35 días de la siembra se cosecharon las plantas cortándolas a 1 cm por encima de la superficie del suelo, se lavaron y secaron en una estufa con circulación forzada a 70°C por 48 horas y luego se pesaron para conocer la materia seca (MS). El tejido vegetal se digirió con ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno, la determinación de P se realizó por colorimetría y el Ca por absorción atómica. Al momento de la cosecha se tomó una muestra de suelo, se secó al aire y se determinaron los niveles de P y Ca residual.

Con los valores MS y el P absorbido (Pab) en el vástago se calculó la eficiencia agronómica relativa (EAR) para MS y Pab, la cual expresa el comportamiento de los rendimientos obtenidos y del P absorbido con la aplicación de las RF respecto al FDA, expresado en porcentaje según a la siguiente fórmula (Chien et al., 1990):

$$\% \text{ EAR (MS)} = \frac{\text{MS RF} - \text{MS Testigo (OP)}}{\text{MS FDA} - \text{MS Testigo (OP)}} \times 100$$

$$\% \text{ EAR (Pab)} = \frac{\text{Pab RF} - \text{Pab Testigo (OP)}}{\text{Pab FDA} - \text{Pab Testigo (OP)}} \times 100$$

Los datos obtenidos se analizaron estadísticamente calculando la varianza y la

prueba de medias de Tukey, usando el paquete estadístico Statistix versión 8.0.

RESULTADOS

La acidulación de la RF con 100 % de ácido sulfúrico incrementó el P_2O_5 total en 2,84 unidades respecto a la RF, mientras que la roca acidulada con TSA incrementó el P_2O_5 total en 0,51 y 1,26 unidades en R30T y R100T, respectivamente. Se destaca que el P_2O_5 disponible en R30T fue 12,92 % mayor que en RF (Cuadro 1).

Cuadro 1. Análisis químico de las rocas fosfóricas

Roca	P_2O_5 (%)	
	Total	Disponible*
RF	25,00	0
RA	27,84	12,03
R30T	25,51	12,92
R100T	26,26	11,10

* P_2O_5 Disponible = P_2O_5 hidrosoluble + P_2O_5 soluble en citrato de amonio

Experimento en suelo sin encalar

Con el uso de las fuentes de fósforo se logró un aumento en la producción de MS y del Pab por el frijol con respecto al testigo (Cuadro 2), evidenciándose la deficiencia de P en este suelo y la respuesta de la planta a los fertilizantes.

La mayor producción de MS y mayor Pab en el tejido de la planta se obtuvo con el fosfato diamónico. De igual manera, se observó que el mejor comportamiento entre las rocas correspondió a RA y R30T tanto para la MS como para Pab. La producción de MS y P absorbido fue menor cuando se aplicó RF y R100T, aunque fueron, a su vez, mayores al tratamiento OP.

La EAR de las fuentes de P, con respecto al FDA, en términos de incremento de MS y Pab siguió el orden $\text{FDA} > \text{R30T} = \text{RA} > \text{RF} = \text{R100T}$ (Cuadro 3). La efectividad de R100T en comparación con el FDA fue baja e igual a RF. Con R30T y RA la EAR de la MS con respecto al FDA, fue de 68,43 y 67,32 % respectivamente, lo que puede ser atribuido al efecto del proceso de acidulación sobre la solubilización de la RF. La EAR respecto al Pab también fue mayor en R30T y RA (53,44 y 47,83 %, respectivamente), lo cual se asocia con la mayor absorción del P proveniente de estas rocas.

Cuadro 2. Materia seca (MS) y absorción de nutrientes en el frijol bajo condiciones del ensayo en suelo sin encalar

Tratamiento	MS (g.planta ⁻¹)	P (mg.planta ⁻¹)	Ca (mg.planta ⁻¹)
0P	0,97 d	0,96 d	6,35 c
FDA	4,99 a	8,49 a	27,57 a
RF	2,78 c	3,18 c	31,50 a
R30T	3,70 b	4,96 b	27,00 a
R100T	2,75 c	3,02 c	18,27 b
RA	3,69 b	4,57 b	25,90 ab

Valores en la misma columna seguidos de la misma letra no son estadísticamente diferentes según Tukey ($P \leq 0,05$)

Cuadro 3. Eficiencia agronómica relativa (EAR) del frijol para materia seca (MS) y fósforo absorbido en suelo sin encalar

Tratamiento	EAR MS (%)	EAR Pab (%)
FDA	100 a	100 a
RF	45,01 c	29,59 c
R30T	68,43 b	53,44 b
R100T	44,24 c	27,38 c
RA	67,32 bc	47,83 b

Valores en la misma columna seguidos de la misma letra no son estadísticamente diferentes según Tukey ($P \leq 0,05$)

La absorción de calcio fue mayor y estadísticamente igual para RF, R30T, FDA y RA. Con R100T la absorción de Ca fue menor que el resto de las rocas. La liberación de Ca en el suelo fue mayor cuando se aplicó RF (Cuadro 4) y no se encontraron diferencias en el Ca residual entre las rocas aciduladas y el FDA, aunque la R30T obtuvo el mayor valor.

Con la aplicación de FDA se obtuvo el mayor contenido de P residual en el suelo en los 35 días que duró el ensayo (Cuadro 4), y las RF

presentaron valores menores de P residual que las correspondientes a FDA. Entre las fuentes RF, R30T, R100T y RA no se encontró diferencias en la cantidad de P residual en el suelo.

Experimento en suelo encalado

En general, los promedios de producción de MS y de P absorbido por la planta de frijol en el suelo encalado tendieron a ser mayores que los obtenidos en el suelo sin encalar (Cuadros 2 y 5).

Cuadro 4. Fósforo y calcio residuales en el suelo sin encalar al momento de la cosecha del frijol

Tratamiento	P (mg.kg ⁻¹)	Ca (mg.kg ⁻¹)
0P	2,78 c	232,71 c
FDA	63,37 a	256,17 bc
RF	21,56 b	603,09 a
R30T	24,11 b	346,80 b
R100T	16,34 b	284,30 bc
RA	23,25 b	303,05 bc

Valores en la misma columna seguidos de la misma letra no son estadísticamente diferentes según Tukey ($P \leq 0,05$)

Cuadro 5. Materia seca (MS) y absorción de nutrientes en el frijol bajo condiciones del ensayo en suelo encalado

Tratamiento	MS (g.planta ⁻¹)	P (mg.planta ⁻¹)	Ca (mg.planta ⁻¹)
0P	1,35 d	1,66 d	15,00 c
FDA	4,89 a	10,04 a	48,80 a
RF	3,01 c	3,90 c	29,31 b
R30T	4,56 b	7,88 b	46,01 a
R100T	3,12 c	4,99 c	31,60 b
RA	4,42 b	8,17 b	43,88 a

Valores en la misma columna seguidos de la misma letra no son estadísticamente diferentes según Tukey ($P \leq 0,05$)

El FDA generó cantidades de MS y P absorbido estadísticamente mayores que las producidas por todas las rocas (Cuadro 5). Considerando las rocas fosfóricas, se observa que

la producción de MS y P absorbido para R30T y RA fueron estadísticamente iguales entre sí y superiores a R100T y RF. Es decir, el encalado no habría afectado la solubilidad de las rocas

aciduladas y la sustitución del 30 % del ácido sulfúrico por TSA no desmejoró la calidad de la roca acidulada como fuente de P para la planta en el suelo encalado.

La EAR para MS y Pab de las fuentes de P en el suelo encalado siguió el mismo orden que en el suelo sin encalar, es decir, FDA>R30T=RA>RF=R100T (Cuadro 6).

Cuadro 6. Eficiencia agronómica relativa (EAR) del frijol var. Tuy para materia seca (MS) y fósforo absorbido en suelo encalado

Tratamiento	EAR MS (%)	EAR Pab (%)
FDA	100 a	100 a
RF	46,99 c	26,39 c
R30T	90,45 b	74,42 b
R100T	49,91 c	39,69 c
RA	86,56 b	77,98 b

Valores en la misma columna seguidos de la misma letra no son estadísticamente diferentes según Tukey ($P \leq 0,05$)

Al estudiar el Ca absorbido (Cuadro 5), se encontró que éste fue estadísticamente igual en los tratamientos FDA, R30T y RA, y superiores a RF y R100T. Este comportamiento evidencia la baja solubilidad de estas últimas rocas en el suelo encalado. En cuanto al P residual en el suelo, todos los tratamientos incrementaron su valor con respecto el testigo (Cuadro 7), siendo el FDA el de mayor valor por ser la fuente más soluble. Entre las rocas, el tratamiento R30T presentó el mayor valor y fue estadísticamente igual a RA, lo que pone de manifiesto un buen comportamiento agronómico de estas fuentes aciduladas en el suelo encalado.

Cuadro 7. Fósforo y calcio residuales en el suelo encalado fertilizado con fosfatos, al momento de la cosecha del frijol

Tratamiento	P ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Ca ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
OP	6,12 e	930,90 a
FDA	65,35 a	893,40 a
RF	11,86 d	980,89 a
R30T	28,18 b	1024,70 a
R100T	18,74 c	987,15 a
RA	24,06 b	980,89 a

Valores en la misma columna seguidos de la misma letra no son estadísticamente diferentes según Tukey ($P \leq 0,05$)

Como era de esperarse, se observó que el Ca residual se incrementó en los seis tratamientos,

producto de la aplicación de la cal agrícola (Cuadros 4 y 7) aunque no hubo diferencias significativas entre ellos.

DISCUSIÓN

El uso del FDA produjo el mayor incremento de materia seca y de absorción de fósforo, lo cual se atribuye a que es una fuente fosfatada más soluble que la roca fosfórica acidulada y no acidulada. Chien et al. (1996) encontraron que los mayores rendimientos de MS y mayor EAR del maíz fueron obtenidos con la fuente más soluble en relación a las plantas que se les aplicó RF.

El mejor comportamiento entre las rocas correspondió a RA y R30T tanto para la MS como para Pab, lo que indicó una buena disponibilidad del P con estas RF parcialmente aciduladas. Resultados similares fueron encontrados por Rodríguez y Herrera (2002) quienes obtuvieron una mayor producción de MS y P absorbido en *Phaseolus vulgaris* cuando utilizaron RF acidulada al 50 % en comparación a la no acidulada. En otra investigación, Meza et al. (2003) evaluaron la acidulación de la RF de Riecito con vinaza en un suelo ácido y encontraron que el tratamiento con vinaza produjo cantidades de materia seca del maíz y de P en el vástago comparables al fertilizante soluble utilizado en el experimento. Casanova (1994) señaló que la acidulación parcial incrementa la solubilidad y eficiencia de la RF y la hace, en algunos casos, tan eficientes como las fuentes solubles en cultivos de ciclo corto.

Cuando se aplicó RF hubo un incremento de MS y P absorbido con respecto al tratamiento OP, lo cual se atribuye al efecto de la acidez del suelo sobre la solubilidad de la roca. Esto evidenciaría lo reportado por Hammond et al. (1982) en el sentido de que la RF tiene mayor reacción en suelo de pH inferior a 5,5 y que la tasa de disolución de la misma puede ser favorecida cuando el pH del suelo, el Ca intercambiable y la concentración de P sean bajos. De igual manera, Allen et al. (1995), en investigaciones realizadas en un suelo ácido determinó que las altas concentraciones de iones hidrógeno que presentan estos suelos permiten una reacción entre estos iones y la RF, liberándose el P y haciéndolo más disponible para las plantas.

El hecho de que la producción de MS y P

absorbido, así como la EAR y la absorción de calcio, no incrementaron con respecto a RF cuando se aplicó R100T parece indicar que existió una baja disponibilidad de P al utilizar la roca fosfórica acidulada sólo con TSA. Se pudiera señalar que la sustitución total del H_2SO_4 por TSA no habría sido adecuada para acidular la RF.

Rajan (1986), al evaluar la eficiencia de la RF de Carolina del Norte parcialmente acidulada, encontró que ésta fue más efectiva que la roca sin acidular e igualmente efectiva que el fertilizante soluble. Por su parte, McLean y Balam (1967) encontraron igual o mejor respuesta de los cultivos cuando se usó roca parcialmente acidulada en comparación con el SFT. Hammond et al. (1980) reportaron que la eficiencia de la RF Pesca de Colombia, de baja reactividad, se incrementó notoriamente y casi se equiparó con el SFT, por la acidulación parcial con 20 % de ácido sulfúrico.

La mayor absorción de calcio con la RF se debe posiblemente a un efecto favorable de la acidez del suelo. En plantas de frijol, Hammond et al. (1986) encontraron que la RF produjo el mayor porcentaje de Ca en el tejido, indicando una solubilización de la roca producto de la acidez del suelo, y Pérez (2007) explicó que la mayor parte del Ca absorbido en un suelo ácido provino de la disolución de la RF.

Con relación al P residual, López et al. (1991) señalan que la aplicación de SFT produce una mayor cantidad de P disponible en el suelo en periodos cortos de tiempo logrando una mayor producción en la primera cosecha; sin embargo, con la RF los mejores resultados se obtienen a partir de la segunda cosecha, dada la baja solubilidad de la roca.

El hecho de que los promedios de MS y de Pab en el suelo encalado tendieron a ser mayores que en el suelo sin encalar contrasta con lo encontrado por López y Nieves (1993) quienes observaron menor producción de MS y Pab con el incremento del pH en el suelo, como consecuencia del encalado del mismo cuando se aplicó RF como fuente fosfatada. Al considerar las condiciones óptimas para el desarrollo del frijol, se ha observado que el máximo rendimiento de este cultivo se obtiene en suelos de pH entre 5 y 6 (Islam et al., 1980). El suelo utilizado en este experimento tiene un pH 3,3 y con el encado subió a 5,4 por lo que la menor producción de MS y P

absorbido, con todos los tratamientos en el suelo sin encalar, podría estar relacionada con el alto contenido de Al en este suelo. Es conocido que uno de los factores que afecta el desarrollo de las plantas en los suelos ácidos es el alto contenido de Al (Marschner, 1991). Podría suponerse que en el presente ensayo el efecto favorable del encalado del suelo por la neutralización del Al habría superado al efecto negativo que produce el incremento del pH sobre la disolución de la RF.

En el suelo encalado (pH 5,4) se habría neutralizado el efecto detrimental del Al, permitiendo así un mejor uso del P de las fuentes fosfatadas utilizadas y por lo tanto, un mejor desarrollo del cultivo. Otani y Ae (1996) encontraron mayor absorción de P en sorgo en un suelo encalado, donde se disminuyó el Al intercambiable. Asimismo, Barrientos et al. (1994) señalan que en la etapa de establecimiento de las leguminosas en suelos ácidos se restringe drásticamente la producción de MS cuando no se utiliza encalado.

El efecto del encalado sobre la efectividad de las rocas fosfóricas en el suelo ha sido bien estudiado. Khasawneh y Doll (1978) señalan que la eficiencia relativa de la RF decrece cuando se encala el suelo para disminuir la acidez e incrementar el nivel de Ca en el mismo. Ouatmane (1999), al comparar la efectividad de varias rocas fosfóricas en suelos ácidos encontró que la EAR disminuyó con el incremento del pH. Pérez y Smyth (2005) encontraron que la EAR de la RF en *Brachiaria* y *Stylosanthes* disminuyó con el encalado del suelo. Sin embargo, como ya se indicó, las mayores EAR encontradas en el suelo encalado en comparación con las obtenidas en el suelo sin encalar (Cuadros 3 y 6) pueden deberse a la neutralización del Al, lo cual habría creado mejores condiciones para el desarrollo del frijol.

Dado que el tratamiento R100T produjo cantidades de P residual menores a las obtenidas con las otras rocas aciduladas hace suponer que el aumento del pH del suelo disminuyó la solubilización de esta fuente fosfatada. Fernández y Meza (2004) explicaron que la alta concentración de Ca intercambiable en la solución del suelo encalado afectó la disolución de la RF acidulada con vinaza, disminuyendo la cantidad de P residual en el suelo.

En el suelo encalado el P residual obtenido con la RF resultó el más bajo entre los materiales

fosfatados, lo que refleja su baja solubilidad cuando aumenta el pH del suelo. Esto coincide con lo reportado por Chien et al. (1995) quienes hallaron que el incremento del pH y del Ca en el suelo producto del encalado del suelo puede disminuir la disolución de la roca fosfórica.

Finalmente, puede señalarse que debido a que los tratamientos R30T y RA presentaron igual efectividad, se concluye que R30T representa una alternativa de roca fosfórica parcialmente acidulada económica para cultivos de ciclo corto como el frijol.

CONCLUSIONES

La roca fosfórica obtenida sustituyendo el 30 % del ácido sulfúrico por tiosulfato de amonio en el proceso de acidulación resultó ser tan efectiva como la roca acidulada con sólo ácido sulfúrico como fuente de fósforo para el frijol (planta leguminosa). Dado que en una experiencia previa se comprobó esta efectividad en plantas de maíz (gramínea), se puede concluir que la RF acidulada con la combinación de ácido sulfúrico y TSA podría ser usada en una amplia gama de cultivos anuales.

La roca fosfórica acidulada sólo con TSA mostró una baja efectividad.

El encalado del suelo no disminuyó la eficiencia de las rocas aciduladas ya sea con ácido sulfúrico solo o combinado con el TSA.

AGRADECIMIENTO

Al Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico (CDCHT) de la Universidad Centroccidental "Lisandro Alvarado", por el financiamiento otorgado.

LITERATURA CITADA

- Adediran, J.A., F.I. Oguntuyinbo, R. Omonode y R.A. Sobul. 1998. Evaluation of phosphorus availability from three phosphorus sources in Nigerian soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 29(17-18): 2659-2673.
- Allen E, D. Ming, L. Hossner y D. Henninger. 1995. Modeling transport kinetics in clinoptilolite-phosphate rock. *Systems. Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 248- 255.
- Barrientos, L., R. Campillo y E. Méndez. 1994. La acidez del suelo y su efecto sobre la fijación simbiótica de nitrógeno y fósforo en leguminosas. *Agricultura Técnica* 54 (2):118-123.
- Casanova, E. 1994. Respuestas agronómicas y alternativas tecnológicas en el uso de rocas fosfóricas naturales y modificadas en cultivos y suelos de Venezuela. *Terra* 12(1):106-116.
- Chien, S.H., P.W.G. Sale y D.K. Friesen. 1990. A discussion of the methods in for comparing the effectiveness of phosphate fertilizers varying in solubility. *Fert. Res.* 24: 149-157.
- Chien, S.H., R.G. Menon y K.S. Billingham. 1996. Phosphorus availability from phosphate rock as enhanced by water-soluble phosphorus. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60:1173-1177.
- Chien, S.H., R.G. Menon, R.W. Taylor y K.R. Sistan. 1995. Evaluation of agronomic effectiveness of phosphate rocks for aluminum tolerant soybean cultivar. *Commun. Soil sci. Plant Anal.* 26 (19-20): 3133- 3144.
- Fernández, S. y R. Ramírez. 2001. Efecto del sistema radical de siete líneas de maíz en los cambios de pH de la rizósfera y su influencia en la disponibilidad del fósforo. *Bioagro* 13(1): 3-9.
- Fernández, S.M. y C.A. Meza. 2004. Efecto residual de la roca fosfórica de Riecito modificada por calcinación o acidulación sobre plantas de maíz en suelos con nivel variable de calcio. *Bioagro* 16(2): 93-98.
- Hammond, L.L., S.H. Chien y J.R. Polo. 1980. Phosphorus availability from partial acidulation of two phosphate rocks. *Fert. Res.* (1): 37-49.
- Hammond, L., L. León y L. Restrepo. 1982. Efecto residual de la aplicación de 7 fuentes de fósforo sobre el rendimiento de *Brachiaria decumbens* en un oxisol de Carimagua. *Suelos Ecuatoriales* 12(2): 196-206.

12. Hammond, L.L., S.H. Chien y A.U. Mokwunye. 1986. Agronomic value of unacidulated and partially acidulated phosphate rocks indigenous to the tropics. *Adv. Agron.* 40: 89-140.
13. Islam, R., A. Ayanaba y F.E. Senders. 1980. Response of Cowpea (*Vigna unguiculata*) to inoculation with VA-Mycorrhizal fungi and to rock phosphate fertilization in some unsterilized nigerian soils. *Plant and soil* 54: 107-117.
14. Kadi, N., M. Sánchez, J. Hurtado y R. González. 1991. Evaluación agronómica de la roca fosfórica parcialmente acidulada en suelos ácidos. *Rev. Fac. Agron. Maracay.* 17: 449-459.
15. Khasawneh, F.E. y E.C. Doll. 1978. The use of phosphate rock for direct application to soils. *Advances in Agronomy* 30: 159-206.
16. López, A., E. Casanova, L. Chacón, M. Paz y J. Guerrero. 1991. Efecto residual de rocas fosfóricas del estado Táchira, usando maíz (*Zea mays* L.) como cultivo indicador. *Rev. Fac. Agron. Maracay.* 17: 341-348.
17. López, I. y L. Nieves. 1993. Efecto de los niveles de fósforo y calcio disponibles, capacidad de adsorción de fósforo y pH del suelo sobre la reactividad de la roca fosfórica en cinco suelos ácidos de Venezuela. *Agronomía Tropical* 43(1-2): 59-74.
18. Marschner, H. 1991. Mechanisms of adaptation of plants to acid soils. *Plant and Soil* 134: 1-20.
19. McLean, E.O. y B.S. Balam. 1967. Partially acidulated rock phosphates as a source of phosphorus to plants. III. Uptake of corn from soils at different calcium status. *Soil. Sci. Soc. Am. Proc.* 31: 811-814.
20. Meza, C.A., S.M. Fernández, L.M. Meléndez. 2003. Roca fosfórica de Riecito tratada con vinaza y altas temperaturas como fuente de fósforo para el maíz. *Agronomía Tropical* 53(3): 315-330.
21. Otani, T. y N. Ae. 1996. Phosphorus (P) uptake mechanisms of crops grown in soils with low P status. I. Screening of crops for efficient P uptake. *Soil Sci. Plant Nutr.* 42 (1): 155-163.
22. Ouattmane, A. 1999. Agronomic effectiveness of phosphate rocks (PR) in direct application to acid soils of Morocco. *Imphos Phosphate Newsletter* 10: 10.
23. Pérez, M.J. 2007. Eficiencia de algunas leguminosas en la utilización de fósforo proveniente de rocas fosfóricas. *Rev. Fac. Agron. LUZ* 24: 113-132.
24. Pérez, M.J. y T.J. Smyth. 2005. Potencial agronómico y eficiencia agronómica de tres rocas fosfóricas de diferente composición mineralógica. *Rev. Fac. Agron. LUZ* 22(3): 214-228.
25. Pérez, M.J., B. Trung y J.C. Fardeave. 1995. Solubilidad y eficiencia agronómica de algunas rocas fosfóricas venezolanas (natural y modificadas) mediante el uso de técnicas isotópicas. *Agronomía Tropical* 45(4): 483-505.
26. Rajan, S.S.S. 1986. Partial acidulation of an unground phosphate rocks: II Plant availability of phosphate. *Fert. Res.* 8: 219- 229.
27. Robinson, J.S., J.K. Syers y N.S. Bolan. 1992. Importance of proton supplí and calcium-sink size in the dissolution of phosphate rock materials of different reactivity in soil. *J. Soil Sci.* 43: 447-459.
28. Rodríguez, R., y J. Herrera. 2002. Field evaluation of partially acidulated phosphate rocks in a Ferralsol from Cuba. *Nutrient Cycling in Agroecosystems.* 63: 21-26.
29. Sequera, O. y R. Ramírez. 2003. Fósforo, calcio y azufre disponibles de la roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico y tiosulfato de amonio. *Interciencia* 28(10): 604-610.
30. Vera, J., E. Casanova y C. Sánchez. 1988. Evaluación de la efectividad agronómica de la roca fosfórica modificada (Lobatera y Riecito). *Rev. Fac. Agron. Maracay* 17: 127-130.