

Comparación del efecto de dos especies forrajeras sobre el pH de la rizosfera y la disolución de rocas fosfóricas de diferente reactividad

M. J. Pérez¹ y T. Jot Smyth²

¹Recursos Agroecológicos, INIA-CENIAP, Apdo. Postal 4669, Maracay 2101-A, Aragua, Venezuela.

²Department of Soil Science, North Carolina State University, Raleigh, NC 27695-7619.

Resumen

La acidez y bajas concentraciones de Ca y P en solución son los principales factores del suelo que controlan la disolución de las rocas fosfóricas (RFs). Las raíces de las plantas pueden afectar la disolución de las RFs, mediante la extrusión de H⁺ u OH⁻ hacia la rizosfera. El objetivo de este estudio fue comparar el efecto de dos especies forrajeras: *Brachiaria decumbens* (gramínea) y *Stylosanthes guianensis* (leguminosa) sobre la acidificación de la rizosfera y la disolución de RFs de diferente reactividad, en un Ultisol deficiente en P y Ca. El experimento se realizó en cámara de crecimiento controlada a 30/26°C día/noche, 12/12 horas día/noche y 30% de humedad relativa y consistió en una combinación factorial de las dos especies forrajeras, dos niveles de pH del suelo (suelo (pH 4,9 original y encalado hasta pH 5,8 con MgCO₃) y cinco tratamientos de P dispuestos en un diseño experimental de parcelas divididas. Los tratamientos de P consistieron en aplicar 50 mg kg⁻¹ de P soluble en citrato de amonio, provenientes de las RFs Monte Fresco (RFMF), Riecito (RFR) y Carolina del Norte (RFCN), fosfato monocalcico grado reactivo [Ca(H₂PO₄)₂] como referencia de una fuente de P soluble (SFT) y un testigo sin P. Se utilizaron potes especiales diseñados para aislar suelo de la rizosfera y no-rizosfera. El pH de la rizosfera disminuyó en los tratamientos con *Stylosanthes*, pero aumentó en

Recibido el 27-11-2003 • Aceptado el 30-6-2004

Autor para correspondencia email: ¹mjperez@inia.gov.ve; ²jot_smyth@ncsu.edu

aquellos con *Brachiaria*. La acidificación de la rizosfera y mayor disolución de las RFs con el *Stylosanthes* estuvo asociada con una mayor área superficial de raíces, mayor absorción de Ca y dependencia de esta especie en la fijación biológica de N_2 , lo cual pudo resultar en un exceso de cationes en la planta y el eflujo de H^+ a través de las raíces hacia la rizosfera. La disolución de las RFs fue influenciada por la interacción de la especie de planta y la composición mineralógica de las RFs. La RFMF presenta menor contenido de apatita y mayor contenido de $CaCO_3$ que la RFR y RFCN, lo cual correspondió con los altos valores de pH ($>7,0$) y DCa en suelo, y bajos valores de materia seca aérea con esta RF. En los tratamientos con la RFMF, la acidificación de la rizosfera por parte de la leguminosa no fue suficiente para promover la disolución de esta RF. La RFR se comporta mejor que la RFCN, a medida que aumenta la acidez del suelo.

Palabras clave: rizosfera, rocas fosfóricas, especies forrajeras, P. disponible.

Introducción

Se ha reportado que ciertas especies de plantas tales como las leguminosas y oleaginosas pueden acidificar la rizosfera significativamente, haciéndolas más eficientes en el uso del P de rocas fosfóricas (1, 2, 3, 4, 5). Estas especies tienen la habilidad de activar ciertos procesos fisiológicos en los cuales las raíces pueden expulsan H^+ y/o ácidos orgánicos hacia la rizosfera para mantener el balance interno de cargas y la neutralidad celular de la planta.

Por otra parte, en condiciones de suelos ácidos, deficientes en P, es común observar gran proliferación de raicillas en ciertas plantas. En plantas deficientes en P, la relación raiz/parte aérea tiende a ser mayor que en plantas sin deficiencias de P. El sistema radical se convierte en el principal órgano de almacenamiento de fotosintetizados y de P transportados desde la parte aérea de la planta y se

caracteriza por una alta tasa de respiración, por lo tanto alta demanda de oxígeno (6). El aumento en área superficial de raíces de plantas deficientes en P puede ser considerado como una estrategia para lograr explorar mayor volumen de suelo y solubilizar P del suelo (6). Hinsinger y Gilkes (4) reportaron que algunas leguminosas como el lupin blanco (*Lupinus albus L.*) tienen alta capacidad para disolver rocas fosfóricas y sugieren que esto pudiera estar relacionado con la mayor biomasa de raíces o con la mayor actividad de las raicillas de esta especie, con relación a otras especies.

El objetivo de este estudio fue comparar el efecto de dos especies forrajeras (*Brachiaria decumbens* vs. *Stylosanthes guianensis*) sobre la acidificación de la rizosfera y la disolución de tres RFs de diferente composición química y mineralógica.

Materiales y métodos

Diseño y Manejo del Experimento

El experimento se realizó en una cámara de crecimiento, bajo las siguientes condiciones ambientales: 30/26°C día /noche, 12/12 horas luz / oscuridad y 30% humedad relativa. Se utilizaron potes especiales, diseñados para aislar suelo de la rizosfera y la no-rizosfera (figura 1). El pote esta conformado por tres compartimientos: el compartimiento superior e inferior lo constituyen dos tubos de cloruro de polivinilo (PVC) de 17 cm de diámetro interno y 7 cm de altura. Estos compartimientos fueron conectados a un compartimiento central, el cual consiste de dos laminas de PVC perforadas y en las cuales van insertados 20 tubos o columnas de PVC de 15 mm de diámetro interno. Dentro de estas columnas fueron insertados tubos plásticos de 11 mm de diámetro interno, llenos con el mismo suelo-tratamiento que ocupa el compartimiento superior e inferior del pote. Sobre la parte superior del compartimiento central se colocó una membrana de nylon de 10 mm (Spectra/Mesh, Spectrum Labs) y se perforaron huecos en 10 de los veinte tubos, lo que permitió que las raíces pasaran desde el compartimiento superior al compartimiento inferior a través de la mitad de las columnas de suelo. Se consideró suelo de la rizosfera al suelo en los tubos donde las raíces se extendieron hacia la parte inferior del pote y suelo de la no-rizosfera, aquel contenido en los tubos donde se bloqueó la entrada de raíces.

El experimento consistió en una combinación factorial de tratamientos de P, encalado y especies forrajeras, dispuestos en un diseño de parcelas divididas con tres repeticiones. Las especies forrajeras *Brachiaria decumbens* (gramínea) y *Stylosanthes guianensis* (leguminosa) representaron las parcelas principales y la combinación de cinco tratamientos de P y dos niveles de pH del suelo (pH 4,9 y 5,8) representaron las parcelas secundarias. Los tratamientos de P consistieron en aplicar 50 mg kg⁻¹ de P soluble, proveniente de las rocas fosfóricas Monte Fresco (RFMF), Riecito (RFR) y Carolina del Norte (RFCN) y fosfato monocalcico grado reactivo [Ca(H₂PO₄)₂] como referencia de una fuente de P soluble (SFT), mas un control sin P. Las cantidades de RF requerida para suplir 50 mg kg⁻¹ de P soluble, fueron calculadas sobre la base de la cantidad de P soluble en citrato de amonio neutro de cada RF. Los dos niveles de pH del suelo fueron: el pH original del suelo, 4,9 y encalado hasta pH 5,8 utilizando 0,15 cmol kg⁻¹ de Mg como MgCO₃. Se utilizó un suelo arenoso clasificado como Arenic Paleudults y deficiente en P y Ca (4 mg kg⁻¹ de P-Olsen y 0,14 cmol kg⁻¹ de Ca intercambiable). La humedad del suelo se mantuvo a capacidad de campo durante todo el experimento, utilizando un reflectómetro de impulso eléctrico conocido como TDR. Las semillas de *Stylosanthes* fueron inoculadas aplicando una suspensión de inculo específico para *Stylosanthes* (15g de inculo para

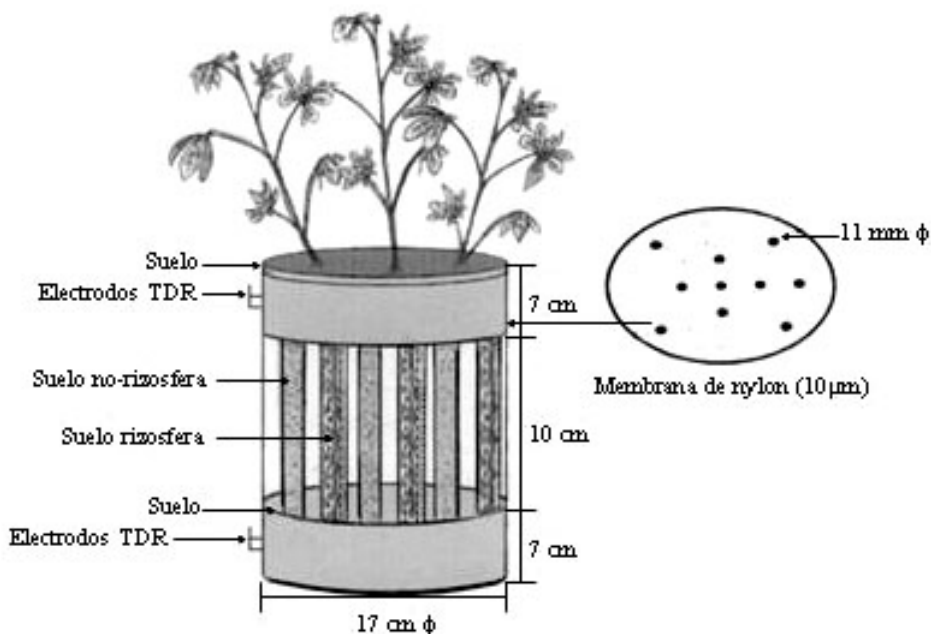


Figura 1. Diagrama del pote utilizado en el experimento para aislar suelo de la rizosfera y la no-rizosfera.

Stylosanthes/150 mL de agua destilada). Se aplicó fertilización básica a través de soluciones nutritivas tres veces a la semana. En los pots con Brachiaria, la cantidad total de macronutrientes aplicados por pote durante el experimento, expresados en mg kg^{-1} de suelo fueron las siguientes: 160 de N, 330 de K, 88 de Mg y 150 de S como $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$, KNO_3 , MgSO_4 y K_2SO_4 ; y la cantidad total de micronutrientes aplicados, expresados como mg kg^{-1} de suelo fueron los siguientes: 54 de Mn como $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$; 4,0 de Cu como $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$; 6,7 de B como H_3BO_3 ; 2,1 de Mo como $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; 0,36 de Co como $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; 364 de Fe

como $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; 197 de Na como $\text{Na}_2\text{H}_2\text{EDTA}$ y NaCl . Mientras que en Stylosanthes se aplicó: 250 de K, 52 de Mg y 170 de S como MgSO_4 y K_2SO_4 , y la cantidad total de micronutrientes aplicados, expresados como mg kg^{-1} de suelo fueron los siguientes: 55,6 de Mn como $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$; 3,8 de Cu como $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$; 6,9 de B como H_3BO_3 ; 2,2 de Mo como $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; 0,37 de Co como $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; 374,8 de Fe como $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y 216 de Na como $\text{Na}_2\text{H}_2\text{EDTA}$ y NaCl .

Las plantas fueron cosechadas a las ocho semanas después de la siembra y se determinó materia seca aérea, peso fresco de nódulos (en la

leguminosa), peso fresco de raíces / volumen de suelo en los tubos para aislar rizosfera y contenido total de N, P y Ca en tejido. El N total se determinó por combustión usando un analizador CHN (Perkin Elmer 2400 CHN). El Ca y P en tejido fueron extraídos por combustión húmeda en solución de HNO_3 concentrado, 33% H_2O_2 y 6N HCl. El Ca y P fueron determinados por ICP (plasma inductivamente acoplado). En suelo se determinó pH, P disponible y Ca intercambiable en suelo de la rizosfera y la no-rizosfera. El pH se determinó en una relación 1:2,5 suelo-agua. El P disponible fue extraído con NaHCO_3 0,5M (método Olsen) y se determinó por espectrofotometría utilizando el método del complejo azul de molibdato (7). El Ca intercambiable fue extraído con KCl 1M en una relación 1:10 suelo-solución extractante y se determinó por absorción atómica.

El efecto de la especie forrajera sobre la disolución de las RFs fue determinado por la diferencia en P disponible y Ca intercambiable entre cada tratamiento con RF y el control

sin P, dentro de cada especie forrajera y tratamiento de encalado; estas diferencias serán referidas como ΔP -Olsen y ΔCa .

Una vez determinado el peso fresco de raíces, estas fueron preservadas en solución de etanol al 20% y mantenidas en refrigeración hasta el momento de medirlas. Se utilizó un sistema computarizado (Scanner-computador) con un software diseñado para medir longitud, grosor y área superficial de raíces, basado en la discriminación de bordes (8) a una resolución de 29,5 pixels/cm. Para mejorar el contraste de scaneo, las raíces fueron teñidas, sumergiéndolas en una solución de azul de metileno al 5% por 5-10 minutos y luego fueron lavadas con agua hasta remover el exceso del tinte.

Se realizó el análisis de varianza de los datos usando el programa para diseño de parcelas divididas del Statistical Analysis System (9) y se realizaron pruebas de medias por la mínima diferencia significativa (MDS) cuando los valores de F resultaron significativos ($P < 0,05$).

Resultados y discusión

Producción de materia seca

Hubo diferencias significativas ($P < 0,05$) en materia seca aérea entre especies forrajeras, tratamientos de P y sus interacciones. El valor promedio de materia seca aérea de *Brachiaria* fue el doble al de *Stylosanthes*. En ambas especies, el peso seco aéreo promediado por tratamiento de encalado, aumento con la solubilidad de la fuente de P (fi-

gura 2). No hubo diferencia significativa en peso seco aéreo entre los tratamientos con RFR, RFCN y SFT bajo *Stylosanthes*, mientras que en *Brachiaria* el peso seco aéreo fue mayor con SFT, y disminuyó en el siguiente orden $\text{RFCN} > \text{RFR} > \text{RFMF}$. Con la RFMF los valores de peso seco aéreo fueron menores que con el tratamiento control sin P en ambas especies forrajeras.

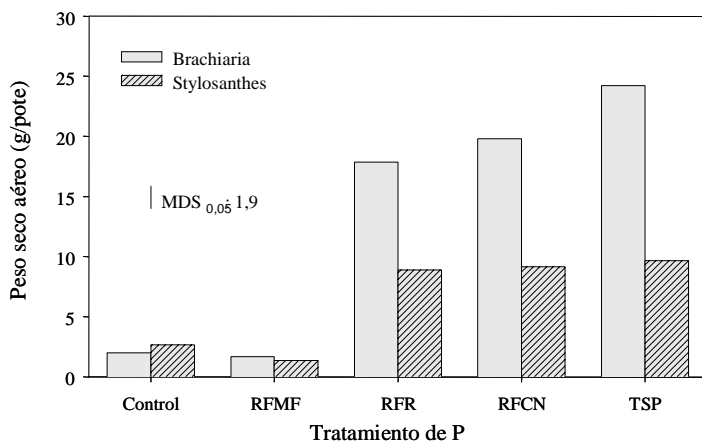


Figura 2. Efecto de los tratamientos de P sobre la producción de materia seca aérea en Brachiaria y Stylosanthes. Valores promedio por tratamientos de encalado.

Absorción de P

El P absorbido por los cultivos fue significativamente afectado por los tratamientos de P y varió entre cultivos. En los tratamientos con la RFMF (la RF de baja solubilidad) el P absorbido por ambos cultivos fue similar al tratamiento control sin P e inferior a los tratamientos con las demás fuentes de P (figura 3). Las diferencias en absorción de P entre especies, sólo fueron observadas en los tratamientos con SFT, donde la absorción de P fue mayor en Brachiaria que en Stylosanthes, lo cual indica que la gramínea es más dependiente de fuentes de P soluble que la leguminosa. Esto se corresponde con lo señalado por Van Raij y Van Diest (1), Marschner (6) y Diest et al. (10) quienes reportaron que las leguminosas tienen mayor capacidad para utilizar RFs que las especies dependientes de N mineral.

Absorción de Ca

Hubo diferencias significativas

($P < 0,05$) en Ca absorbido entre las especies forrajeras, tratamientos de P y sus interacciones. El valor promedio de Ca absorbido en Stylosanthes fue más de 5 veces mayor que el absorbido en Brachiaria. La absorción de Ca en Stylosanthes fue significativamente mayor en los tratamientos con RFCN, RFR y SFT que en los tratamientos con RFMF y el control sin P (figura 4). En Brachiaria no hubo diferencias significativas en absorción de Ca entre los tratamientos con P. La concentración promedio de Ca en Brachiaria fue 0,11%, mientras que en Stylosanthes fue 0,16%. Cabe mencionar que no se aplicó Ca, excepto el Ca contenido en los fosfatos evaluados. Esto indica que la leguminosa actúa como un sumidero del Ca liberado de los fosfatos, disminuyendo así la concentración de Ca en solución del suelo, lo cual puede promover la disolución de las RFs. En este sentido, Robinson *et al.* (11) reportaron que la disolución de las RFs es altamente

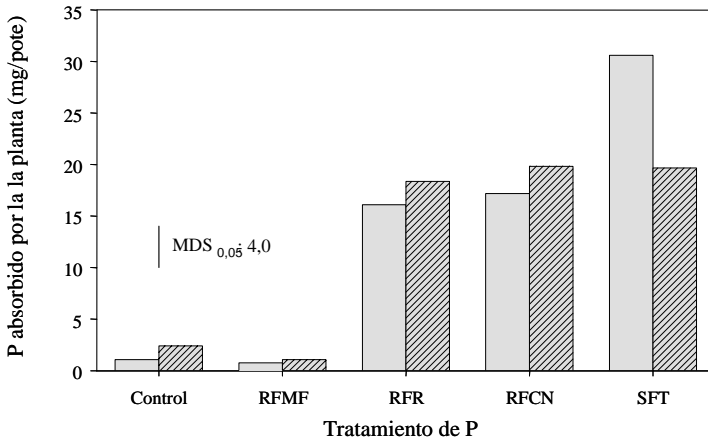


Figura 3. Efecto de los tratamientos de P sobre la absorción de P en Brachiaria y Stylosanthes. Valores promedio por tratamientos de encalado.

influenciada por el tamaño del sumidero de Ca, es decir, a medida que aumenta la absorción de Ca por la planta, menor será su concentración en solución del suelo, lo cual favorece la disolución de las RFs.

Desarrollo de raíces

Hubo diferencias significativas

($P < 0,05$) en longitud, diámetro y área superficial de raíces (en los tubos para aislar suelo de la rizosfera) entre especies, tratamientos de P y sus interacciones (cuadro 1). El crecimiento de raíces en los tubos para aislar suelo de la rizosfera fue mayor en Stylosanthes que en Brachiaria. Las

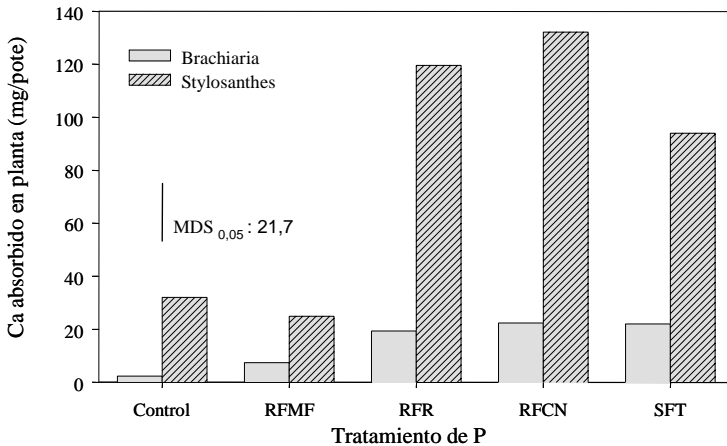


Figura 4. Efecto de los tratamientos de P sobre la absorción de Ca en Brachiaria y Stylosanthes. Valores promedio por tratamientos de encalado.

Cuadro 1. Efecto de la especie de planta y tratamientos de P sobre los valores promedios de pH del suelo en la rizosfera (R), no-rizosfera (NR), diferencia entre rizosfera y no-rizosfera (R-NR) y la longitud, diámetro y área superficial de raíces de Brachiaria y Stylosanthes.

Especie	P	pH en H ₂ O			Raíces		
		R	NR	R-NR	Longitud	Diámetro	Área superficial.
					-----cm/pote-----	cm ² /pote	
Brachiaria	Control	5,79	5,47	0,32	221,5	0,043	10,5
	RFMF	7,48	7,49	-0,02	324	0,047	9,5
	RFR	6,04	5,83	0,21	612,5	0,062	38,0
	RFCN	6,05	5,87	0,19	887,5	0,057	51,5
	SFT	5,49	5,60	-0,11	748,5	0,063	48,5
Promedio		6,17	6,05	0,12	558,8	0,054	31,5
Stylosanthes	Control	4,71	5,04	-0,33	471,5	0,065	29,5
	RFMF	7,30	7,28	0,02	300,5	0,060	18,0
	RFR	4,54	5,35	-0,82	826,0	0,065	59,0
	RFCN	4,72	5,47	-0,75	1045,5	0,065	66,0
	SFT	4,06	5,09	-1,03	901,5	0,063	57,5
Promedio		5,06	5,64	-0,58	709,0	0,064	46,0
-----Promedios Tratamientos de P-----							
	Control	5,25	5,25	0,00	346	0,054	20
	RFMF	7,39	7,38	0,01	312	0,053	14
	RFR	5,29	5,59	-0,30	738	0,064	48
	RFCN	5,38	5,66	-0,28	966	0,061	59
	SFT	4,77	5,34	-0,57	825	0,063	53
MDS 0,05:							
Especie		0,09	0,07	0,10	122	0,003	6
P		0,14	0,11	0,15	192	0,004	10
P x Especie		0,20	0,15	0,21	181	0,007	14

raíces de Brachiaria parecían finos hilos que pasaron a través de los tubos y desarrollaron su mayor masa de raíces en el compartimiento inferior del pote, mientras que el Stylosanthes

presento menor masa de raíces en el compartimiento inferior del pote, pero mayor cantidad de raíces ramificadas en los tubos y en el compartimiento superior del pote. En promedio total,

los valores de longitud, diámetro y área superficial de raíces del *Stylosanthes* en los tubos de la rizosfera fueron 32,2%, 15,6 y 32% respectivamente mayores que en la *Brachiaria* (cuadro 1). El área superficial de raíces en ambas especies aumentó con la solubilidad de la RF, alcanzando la mayor área superficial de raíces en los tratamientos con la RFCN (cuadro 1). El valor promedio de área superficial de raíces del *Stylosanthes* en el tratamiento control sin P fue 3 veces mayor que en la *Brachiaria* (cuadro 1). Tomando en cuenta que en este estudio, la leguminosa presentó mayor absorción de Ca que la *Brachiaria* y que esto correspondió con una mayor área superficial de raíces en la leguminosa, es posible que estos dos factores de la planta sean indicadores de la capacidad de la planta para utilizar P de las RFs; estos resultados apoyan lo señalado por Marschner (6) y Hinsinger y Gilkes (4) al señalar que las leguminosas tienen mayor capacidad para utilizar RFs, lo cual atribuyen a la mayor área superficial de raíces y mayor actividad de las raicillas en leguminosas.

Efecto de la planta y fuente de P sobre la acidificación de la rizosfera

Hubo diferencias significativas ($P < 0,05$) en los valores de pH del suelo en la rizosfera y no-rizosfera debido a los efectos principales e interacciones entre especies forrajeras, encalado y tratamientos de P (cuadro 1). La RFMF aumento considerablemente el pH del suelo bajo ambos cultivos, donde el pH del suelo de la rizosfera de ambos cultivos estuvo en el rango entre 7,3 - 7,4 en tra-

tamientos con encalado y entre 7,3 - 7,6 en tratamientos sin encalar. Los valores promedios de pH del suelo por especie forrajera, indican que hubo mayor acidificación en la rizosfera de la leguminosa que en la de la gramínea. La diferencia en el valor promedio de pH del suelo de la rizosfera y la no-rizosfera aumento en 0,12 unidades en los potes con *Brachiaria* y disminuyo en 0,58 unidades en los potes con *Stylosanthes* (cuadro 1). Esta diferencia en pH entre suelo de la rizosfera y la no-rizosfera estuvo influenciada tanto por la especie de planta como por la fuente de P. Con la RFMF, la diferencia en pH fue muy pequeña bajo ambas especies. Entre los demás tratamientos de P, la acidificación de la rizosfera con *Stylosanthes* con relación a la no-rizosfera presentó el siguiente orden: SFT > RFR = RFCN > control, mientras que en los potes con *Brachiaria*, el pH del suelo de la rizosfera fue mayor que en la no-rizosfera en los tratamientos control, RFR y RFCN.

Efecto de la planta sobre la disolución de las rocas fosfóricas

La disolución de RFs puede estimarse mediante la cuantificación de la RF residual o las cantidades de P y de Ca en el suelo y en las plantas (12). En este trabajo, las cantidades de Ca y P liberadas de las RFs fueron estimadas a partir de las diferencias en Ca intercambiable y P disponible en suelo entre los tratamientos con P y el control al final del experimento y se denotan como DCa y DP-Olsen.

Hubo diferencias significativas ($P < 0,05$) en DCa en suelo de la rizosfera entre los tratamientos con P y especies forrajeras (figura 5). El

alto valor de DCa para los tratamientos con RFMF bajo ambos cultivos, esta asociado con el aumento en pH del suelo a valores $>7,0$ (cuadro 1), lo cual puede ser atribuido a la liberación de Ca del CaCO_3 contenido en esa RF (13). La aplicación de 50 mg de P soluble/kg de suelo con cada fuente de P resulto aplicando diferentes cantidades de Ca, debido a las variaciones en la composición química y mineralógica de las RFs utilizadas (13). Las cantidades de Ca añadidas en mg kg^{-1} de suelo con cada fuente de P fueron de 1870 con RFMF, 336 con RFR, 408 con RFCN y 32 con SFT. No hubo diferencia significativa en los valores de DCa entre los tratamientos con RFR y RFCN bajo ambos cultivos, sin embargo la cantidad de Ca liberado de estas dos rocas fue mayor bajo *Stylosanthes* (figura 5). Los datos de DCa para las tres RFs se corresponden con los resultados de acidificación de la rizosfera (cuadro 1), la producción de biomasa aérea (figu-

ra 2) y la absorción de Ca (figura 4) entre los cultivos y las tres RFs. La mayor acidificación de la rizosfera bajo *Stylosanthes* con RFR y RFCN favoreció la disolución de estas rocas, lo cual se reflejo en mayor desarrollo de las plantas y absorción de Ca que con la RFMF o con *Brachiaria*.

La especie de planta afectó significativamente los valores de DP-Olsen de la rizosfera entre las fuentes de P (figura 6). El valor promedio de DP-Olsen en la rizosfera fue mayor con *Stylosanthes* que con *Brachiaria*. Los valores de DP-Olsen en la rizosfera promediados por especie forrajera y tratamiento de encalado tuvieron el siguiente orden: TSP $>$ RFR = RFCN $>$ RFMF. Los mayores valores de DP-Olsen con SFT en ambos cultivos son consistentes con la alta solubilidad de esta fuente de P, mientras que los bajos valores de DP-Olsen con RFMF en ambos cultivos son consistentes con la baja solubilidad de esta RF. De igual ma-

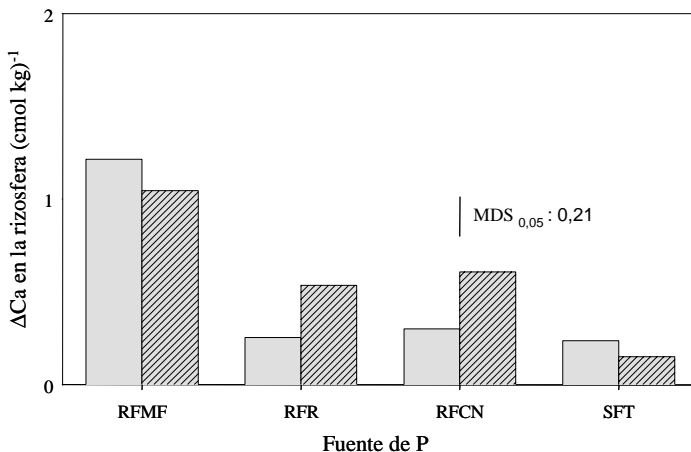


Figura 5. Efecto de la especie de planta y fuente de P sobre la liberación de Ca por disolución de las rocas fosfóricas en suelo de la rizosfera. Valores promediados por tratamientos de encalado.

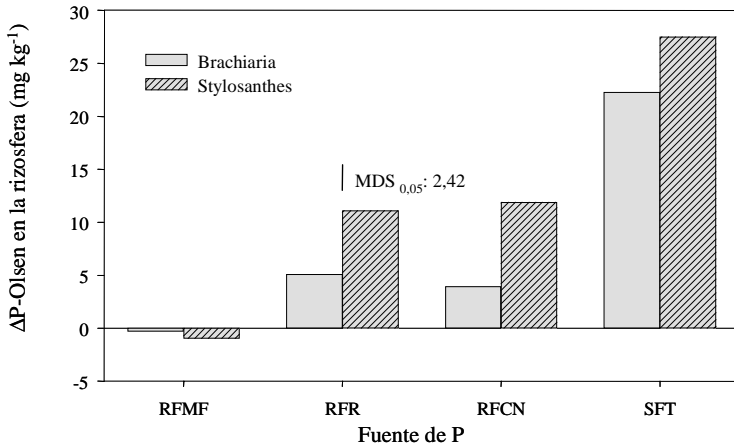


Figura 6. Efecto de la especie de planta y fuente de P sobre la liberación de P por disolución de las rocas fosfóricas en la rizosfera. Valores promedios por tratamientos de encalado.

nera, los mayores valores de DP-Olsen para RFR y RFCN con Stylosanthes en relación con Brachiaria son consistentes con la mayor capacidad de acidificación de la leguminosa, lo cual favorece mayor disolución de las RFs y liberación de P, que en la rizosfera

de la gramínea.

Hubo una relación lineal y negativa entre el pH y el DP-Olsen en la rizosfera ($r = 0,97$) para ambos cultivos (figura 7), lo cual indica la importancia de la acidez del suelo en la disolución de las RFs. Los valores de DP-

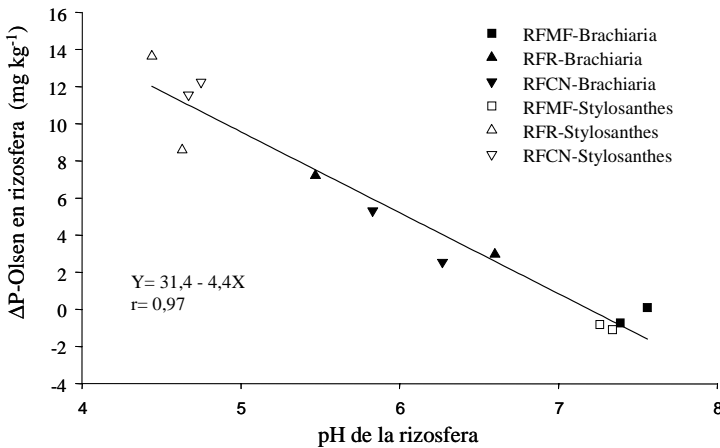


Figura 7. Relación entre el pH del suelo de la rizosfera y el P liberado de las rocas fosfóricas (DP-Olsen) con Brachiaria y con Stylosanthes en suelo encalado (símbolos sólidos) y sin encalar (símbolos vacíos).

Olsen aumentaron con la acidez de la rizosfera. Los mayores valores de DP-Olsen ocurrieron en los tratamientos de la RFR y RFCN con *Stylosanthes*. La RFMF presentó los valores más bajos de DP-Olsen, lo cual esta relacionado con los altos contenidos de CaCO_3 en esta RF (13), el aumento en pH ($> 7,0$) y Ca intercambiable del sue-

lo en los tratamientos con la RFMF (cuadro 1 y figura 5), lo cual limitó la disolución del apatito en este material. Estos resultados apoyan la teoría de que altas concentraciones de Ca intercambiable en solución y alto pH del suelo limitan la disolución de las rocas fosfóricas (12, 14).

Conclusiones

El pH de la rizosfera disminuyó con la leguminosa (*Stylosanthes*) y aumentó con la gramínea (*Brachiaria*). La acidificación de la rizosfera y mayor disolución de las RFs con el *Stylosanthes* estuvo asociada con una mayor área superficial de raíces, mayor absorción de Ca y dependencia de esta especie en la fijación biológica de N_2 , lo cual pudo resultar en un exceso de cationes en la planta y el eflujo de H^+ a través de las raíces hacia la rizosfera. La solubilización de las RFs fue influenciada por la interacción de la especie de planta y la composición mineralógica de las RFs. La RFMF (la RF de baja solubilidad) presenta mayor contenido de CaCO_3 que las RFs Riecito y Carolina del Norte, lo cual

correspondió con el aumento en pH ($> 7,0$) y DCa en suelo, y bajos valores de materia seca aérea en ambos cultivos. En los tratamientos con la RFMF, la acidificación de la rizosfera por la leguminosa no fue suficiente para promover la disolución del apatito en esta RF. La RFR se comporta mejor que la RFCN, a medida que aumenta la acidez del suelo. Se requiere de otros estudios para determinar si la disolución de RFs y mejoras en la disponibilidad de P, debido a la acidificación de la rizosfera por las leguminosas, tal como se observó en este experimento, es también aplicable en suelos con alta capacidad de retención de P.

Literatura citada

1. Van Raij, B. y A. Van Diest. 1979. Utilization of phosphate from different sources by six plant species. *Plant and Soil* 51: 577-589.
2. Aguilar, A. y A. Van Diest. 1981. Rock phosphate mobilization induced by the alkaline uptake pattern of legumes utilizing symbiotically fixed nitrogen. *Plant and Soil* 61: 27-41.
3. Hoffland, E., G.R. Findenegg, y J.A. Nelemans. 1989. Solubilization of rock phosphate by rape. *Plant and Soil*. 113: 161-165.
4. Hinsinger, P. y R.J. Gilkes. 1995. Root-induced dissolution of phosphate rock in the rhizosphere of Lupins grown in alkaline soil. *Aust. J. Soil Res.* 33: 477-489.

5. Johnson, J.F., D.L. Allan, C.P. Vance, y G. Weiblen. 1996. Root carbon dioxide fixation by phosphorus-deficient *Lupinus albus*. *Plant Physiol.* 112: 19-30.
6. Marschner, H. 1995. The soil-root interface (Rhizosphere) in relationship to mineral nutrition. In: *Mineral nutrition of higher plants*. Academic Press, London, Second Edition.
7. Murphy, J. y J. P. Riley. 1962. A modified single extraction solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytical Chimica Act.* 27: 31-36.
8. Pan, W.L. y R.P. Bolton. 1991. Root quantification by edge discrimination using a desktop scanner. *Agron. J.* 83: 1047-1052.
9. SAS PRIMER. 1992. Guide to use SAS System. Statistical Instructional Computing Laboratory. Department of Statistics, NCSU, Raleigh, NC. 64p.
10. Diest, J., P.G. Marais, R.B.A. Harry, y C.F.H. Heyns. 1971. Relative availability of rock phosphate to different plant species. *Agrochimophysica* 3: 35-40.
11. Robinson, J.S., J.K. Syers, y N.S. Bolan. 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.
12. Bolan, N.S. y M.J. Hedley. 1990. Dissolution of phosphate rocks in soils. 2. Effect of pH on dissolution and plant availability of phosphate rock in soil with pH dependent charge. *Fert. Res.* 24: 125-134.
13. Pérez, M. J. 2000. Comparative effect of ion uptake and root growth patterns of forage legume and grass on rhizosphere acidification and solubilization of phosphate rocks. Tesis Doctoral. Universidad del Estado de Carolina del Norte, Raleigh, NC, USA. 123p.
14. Khasawneh, F.E y E.C. Doll. 1978. The use of phosphate rock for direct application to soil. *Adv. in Agron.* 30: 159-204.