

Fracciones de fósforo en suelos cultivados con maíz por más de diez años en Venezuela

Omaira Sequera¹, Ricardo Ramirez^{2*}, Neudis Subero³ y Julio C. Parra⁴

¹Universidad Centro Occidental Lisandro Alvarado, Decanato de Agronomía, Barquisimeto. Lara. Venezuela. ²Postgrado Ciencias del Suelo, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Apdo. 4579. Maracay 2101, Aragua. Venezuela. ³Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo. Valencia, Carabobo. Venezuela ⁴Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Apdo. 4579. Maracay 2101. Aragua. Venezuela

RESUMEN

La producción de maíz en el país tiene lugar en suelos, por lo general, pobres en fósforo (P) por lo que es necesario aplicar oportunamente fertilizantes fosfatados y para que estos sean eficientes es necesario conocer las transformaciones que tienen lugar en los suelos. El objetivo del trabajo fue evaluar los cambios del fertilizante aplicado a siete suelos dedicados al cultivo de maíz. Se diseñaron dos tratamientos sin fósforo (P0) y con 200 mg kg⁻¹ de fósforo (P1) y se incubaron por 140 días, cada 35 días se tomó una muestra de suelo para determinar las fracciones de P de acuerdo al método de fraccionamiento secuencial. El comportamiento de las fracciones disponibles de P inorgánico y lábiles variaron con los suelos. Cuando se aplicó P al suelo, la fracción PiR mostró un incremento significativo en el término de las primeras 24 horas de incubación para luego decrecer, sólo en el suelo S el PiR se incrementó hasta los 70 días para luego decrecer. La fracción PiL en los suelos fertilizados mostró incrementos significativos hasta los 35 días de incubación. Las fracciones PiR y PiL disponibles para la planta, sumadas representaron 31 a 60% del P aplicado al suelo a las 24 horas de incubación y entre el 20 y 58% a los 140 días de incubación.

Palabras clave: Fracciones de Fósforo inorgánico, incubación suelo, fósforo recuperado.

Phosphorus fractions in soils cropped with maize for ten or more years in Venezuela

ABSTRACT

Maize and sorghum production in the country takes place in soils usually low in phosphorus (P) so it is necessary to apply P fertilizers, to produce good crops. The objective of the study was to evaluate the changes in P fertilizer applied to seven soils under maize cultivation for many years. Treatments included two doses of mineral fertilizer: 200 mg P kg⁻¹ (P1) along with P free fertilizer control (P0) and were incubated for 140 days, each 35 days a soil sample was taken to determine P fractions according to the sequential fractionation method. Available inorganic P (Pi) fractions and labile P fractions varied with soils. A significant increase in Pi resin fraction was found in the term of the first 24 hours of incubation. The Pi labil (PiL) fraction in fertilized soils showed significant increments up to 35 days of incubation. Available P fractions to the plant PiR and PiL together accounted for 31 to 60% of the P applied to the soil at 24 hours of incubation and between 20 and 58% at 140 days of incubation.

Key words: Inorganic phosphorus, soil incubation, phosphorus recuperation.

*Autor de correspondencia: Ricardo Ramirez

E-mail: abisam28@gmail.com

INTRODUCCIÓN

La fertilidad de suelos es reconocida como una limitante principal, en el país, para la obtención de altos rendimientos en cultivos como los cereales. El manejo del fertilizante, momento, época y forma de aplicación, es el problema más crítico en el caso de los cultivos de secano. Las lluvias, al inicio de la temporada, son de alta intensidad y los suelos se humedecen rápidamente, esta característica hace que el agricultor disponga de poco tiempo para sembrar y fertilizar en forma eficiente. Por lo general, el fertilizante queda superficial o es aplicado varios días después de la siembra, lo que implica que el nutriente no está disponible para la planta al inicio de su ciclo. Es conocido que la nutrición temprana del cultivo es vital para su buen desarrollo y producción (Grant *et al.*, 2001).

El fósforo en los suelos ácidos tropicales es por lo general bajo y deficiente (Buehler *et al.*, 2002) por lo cual es necesario el uso de fertilizantes fosfatados para la obtención de buenos rendimientos. La dinámica del P en el sistema suelo planta, las formas inorgánicas y orgánicas en las que se convierte el fertilizante fosfatado aplicado al suelo, determinan el diferente grado de solubilidad y distribución del fósforo, que se traduce en la disponibilidad para la planta (Adeli *et al.*, 2005).

La identificación apropiada de las prácticas de manejo del fósforo requiere del buen conocimiento de cómo se comporta el P aplicado al suelo, así como de métodos confiables para estimar su requerimiento por los cultivos. En el país se han calibrado métodos de análisis de P en los suelos con diferentes cultivos (Ramírez *et al.*, 1987, 1988, 1989a, 1989b; Ramírez, 1989).

El fertilizante fosfatado que se usa en el país es importado y costoso, por lo que se debe procurar obtener la mayor eficiencia posible, para lo cual es necesario conocer las mejores dosis posibles así como los métodos de aplicación más convenientes, pero también el efecto del P aplicado al suelo a largo plazo.

El fósforo aplicado al suelo es con frecuencia adsorbido por las superficies de óxidos de aluminio y hierro y también inmovilizado bajo otras formas poco solubles (Hedley *et al.*, 1994; Linnquist *et al.*, 1997) en especial en los suelos ácidos, otra parte del P es retenido en el suelo bajo formas orgánicas (Zheng *et al.*, 2003).

Para desarrollar sistemas eficientes de aplicación de fertilizantes fosfatados es necesario conocer sus transformaciones en el suelo. Hedley *et al.* (1982) propusieron un sistema de extracción secuencial de las formas inorgánicas y orgánicas de P, posteriormente Tiessen y Moir (1993) señalaron que el anterior método no extrae una considerable parte del P orgánico, por lo cual propusieron una extracción reagrupando las fracciones orgánicas.

El objetivo de este trabajo fue estudiar, en suelos cultivados con maíz por varios años, los cambios de las distintas formas del fósforo aplicado a los suelos durante el proceso de incubación por 140 días.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se seleccionaron 7 suelos, cultivados con maíz entre 10 y 18 años (Cuadro 1) en los principales estados productores de este cereal: 1 en Portuguesa (Pa), 3 en Guárico (G, S, V), 2 en Barinas (B1 y B2) y 1 en Yaracuy (R).

Se tomaron muestras compuestas por 10 a 12 submuestras, en cada sitio, a una profundidad aproximada de 0 a 20 cm. Las muestras se secaron al aire y se desmenuzaron para tamizarlas con un cedazo de 2 mm.

Las dosis de fertilizante fosfatado usado por los agricultores fue muy variable, en el curso de los años, las cifras en el Cuadro 1 reflejan las aplicaciones del último año.

La textura de los suelos se determinó por Boyoucos (1962), pH en relación agua-suelo 2:1, fósforo disponible por Olsen (1954), materia orgánica por Walkley y Black (1934), capacidad de intercambio catiónico y Ca intercambiable por Rhoades (1982), aluminio intercambiable con KCl (Barnhisel y Bertsch, 1982), hierro extraído con solución de DTPA relación 1:2 y máxima capacidad de adsorción de fósforo por Olsen y Watanabe (1957).

El experimento se formó con dos tratamientos, un testigo sin aplicación de fósforo (P0) y un segundo con la aplicación de 200 mg de P por kilogramo de suelo (P1), en forma de superfosfato triple (46% P_2O_5). El fertilizante se aplicó al volumen de suelos correspondiente a las tres repeticiones de cada tratamiento, cuidando de homogeneizar la mezcla cuidadosamente. De cada porción de suelo, P1 y P0, se pesaron 5 kilogramos

Cuadro 1. Localización de los suelos y años de cultivo y dosis de fósforo aplicadas en la última siembra

Suelos	Localización	Años	P ₂ O ₅ g/kg*
Barinas 1 (B1)	Ciudad Bolivia, Edo Barinas	10	35
Barinas 2 (B2)	Serie Barinas, Edo. Barinas	11	40
Guacamaya (G)	El Sombrero, Edo Guárico	10	80
Silbón (S)	Espino Edo. Guárico	10	70
Valle La Pascua (V)	Valle La Pascua Edo Guárico	18	40
Paldillo (Pa)	Ospino Edo Portuguesa	15	48
Ramón (R)	Las Velas, Yaritagua Edo. Yaracuy	18	64

* Dosis aplicada en el último año.

en potes plásticos para su incubación. Los potes se colocaron en un invernadero, enfriado con cortina de agua, la temperatura varió entre 23 y 35°C. La humedad de los suelos se mantuvo entre 10 y 80% de la capacidad de campo, aplicando agua destilada cuando fue necesario. El tiempo de incubación fue de 140 días.

El diseño experimental correspondió a un arreglo factorial completamente al azar con dos tratamientos: fósforo (P0 y P1) y 7 suelos, con 3 repeticiones.

En el curso del experimento se tomaron muestras de suelo desde la superficie del suelo hasta el fondo del pote, con la ayuda de un tubo metálico de 2,5 cm de diámetro a los 1, 35, 70, 105 y 140 días. Las muestras se secaron al aire, se trituraron y se pasaron por un cedazo de 2 mm y se guardaron en un frasco de polietileno para su posterior análisis.

El fraccionamiento de fósforo se hizo siguiendo el método sugerido por Tiessen y Moir (1993) y se puede resumir en la siguiente forma:

- P en resina (PiR), se pesaron 2,0 g de suelo en un tubo de centrífuga, se agregaron 20 ml agua destilada y dos tiras de resina de intercambio aniónico de 9 por 62 mm, se agitaron por 16 horas, se removió la resina y éstas se agitaron en un tubo de centrífuga con 20 mL de HCl 0,5 M por 16 horas, en el extracto se determinó fósforo.
- P inorgánico lábil (PiL) y P orgánico lábil (PoL). Al suelo restante se agregó 20 ml NaHCO₃ 0,5 M (pH 8,5), seguido por 16 horas de agitación, en el sobrenadante se determinaron las dos fracciones.

- P inorgánico moderadamente lábil (PiML) y P orgánico moderadamente lábil (PoML). Al suelo restante se agregó 20 ml de NaOH 0,1 M, seguido por 16 horas de agitación, en el sobrenadante se determinaron las dos fracciones.

- P inorgánico ligeramente lábil (PiLL) y P orgánico ligeramente lábil (PoLL). Al suelo restante se agregó 20 ml HCl 1M, seguido por 16 horas de agitación, en el sobrenadante se determinaron las dos fracciones.

- P inorgánico recalcitrante (PiRC) y P orgánico recalcitrante (PoRC). El suelo restante se digirió con H₂SO₄ concentrado y H₂O₂, en el extracto se determinaron las dos fracciones..

El P en todos los extractos fue determinado por el método colorimétrico de Murphy y Riley (1962).

El PiT y PoT se calcularon sumando las respectivas fracciones de P. El fósforo total (PT) fue el resultado de la sumatoria de las fracciones inorgánicas y orgánicas.

El análisis estadístico de los datos obtenidos se realizó con la ayuda del paquete estadístico InfoStat (2016) y la comparación de medias fue hecha por Tukey para P ≤ 0,05.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El P disponible en los suelos originales fue variable (Cuadro 2). Posiblemente como consecuencia del manejo a que fueron sometidos en los años de cultivo, en cinco suelos: B2, G, S, Pa y R el fósforo fue alto, entre 26 y 35 mg kg⁻¹ y bajo en V y B1 8 y 14 mg kg⁻¹ respectivamente. El Ca varió entre bajo en S y muy

Cuadro 2. Análisis físico químico de los suelos usados en el experimento

Suelos	P*	Ca*	Fe*	Al*	M O %	Arcilla %	MCA° mg kg ⁻¹	CIC''	pH
B1	14	180	310	0,85	1,99	36,4	250	8,2	4,9
B2	33	>2000	16	0,01	1,85	24,9	250	9,1	6,8
G	26	250	68	0,08	1,18	12,0	72	5,8	5,6
S	35	42	242	0,68	1,03	6,0	100	5,3	4,6
V	8	149	36	0,64	1,71	70,4	333	14,0	5,2
Pa	31	660	126	0,34	2,58	16,6	250	12,6	5,1
R	33	360	38	0,28	1,70	8,0	100	4,3	5,6

*mg kg⁻¹

°Máxima capacidad de adsorción de fósforo

''Cmol kg⁻¹

alto en B2. Los valores más altos de Fe correspondieron a los suelos B1, S y Pa (310, 242 y 126 mg kg⁻¹ respectivamente) y los más bajos entre 16 y 68 mg kg⁻¹ en G, R, V, y B2. El Al así como la CIC fueron bajos en todos los suelos. La MCA fue variable entre los suelos, en 4 de ellos: B1, B2, V y Pa, se encontraron los valores más altos entre 250 y 333 mg kg⁻¹, en cambio los valores más bajos, entre 72 y 100 mg kg⁻¹, correspondieron a los suelos G, S y R. El pH de seis suelos fue ácido, solo el suelo B2 mostró un pH neutro, el valor más alto. Solo el suelo V fue alto en arcilla 70,4%, en los otros suelos varió entre 6,0 y 36,4%.

Fraciones de fósforo en suelos no incubados

Las fracciones de fósforo en los suelos sin incubar fueron variables (Cuadro 3), PiR fue la menos abundante en los suelos B1, B2, V, Pa, S y R y PiLL en G y S. La fracción más abundante fue PiO en B1, V, Pa y R, pero en los suelos G y S PiML fue la mayor fracción, finalmente PiLL en B2 fue la más alta. Este comportamiento muestra que existe una tendencia a inmovilizar el P en estos suelos. Cardoso et al. (2003) trabajando con suelos ácidos mostraron resultados parecidos con el PiO y PiML.

En el caso de P orgánico la fracción más abundante en seis suelos correspondió a PoML, excepto en G donde la más abundante fue PoO. La forma menos abundante en todos los suelos resultó ser PoLL. La mayor presencia de la fracción PoML muestra que

el fósforo orgánico, en los suelos estudiados, tiene un alto valor como posible fuente de alimentación de P disponible a la solución del suelo para la planta.

El PiT en todos los suelos fue mayor que el PoT, la relación PiT/PoT calculada varió entre 1,2 y 2,8, sólo en los suelos B2 y P fue superior a 2,0. El porcentaje de PiT respecto al P total varió entre 37,2% y 63,0%. Hernández y Bautis (2005) trabajando con suelos ácidos también encontraron que el PiT fue mayor que el PoT en los suelos estudiados.

El PiT en los suelos ácidos fue altamente variable entre 125 y 500 mg kg⁻¹; de acuerdo con Hernández (2008), McKenzie y Bremer (2003), el rango de PiT encontrado en los suelos trabajados fue de 128 y 500 mg kg⁻¹.

El PT en los suelos varió entre 274 y 793 mg kg⁻¹ estos valores son comparables con los encontrados en suelos ácidos por McKenzie y Bremer (2003) y Hernández (2008). Las variaciones en el PT de los suelos pudieran ser atribuidas al manejo de las dosis y forma de aplicación de los fertilizantes por parte de los agricultores.

Fraciones de fósforo en suelos incubados

Cuando se aplicó fósforo a los suelos, el comportamiento de la fracción PiR en todos ellos fue parecido (Figura 1 PiR P1). En el término de las primeras 24 horas de incubación se encontró un incremento significativo para luego decrecer, sólo en el suelo S el PiR se incrementó

Cuadro 3. Fracciones de fósforo inorgánico (Pi) y fósforo orgánico (Po) en los suelos Barinas 1 (B1), Barinas 2 (B2), Guacamaya (G), Silbón (S), Valle La Pascua (V), Paldillo (Pa) y Ramón (R).

Fracciones	B1	B2	G	S	V	Pa	R
PiR*	4,31c	30,6e	18,2c	10,0c	0,7e	13,3e	30,9c
PiL	18,7b	34,7d	35,3a	38,5b	11,8c	35,9d	35,2b
PiML	47,1a	74,7b	34,3ab	47,4a	62,9b	151,9b	32,2b
PiLL	9,3c	78,6a	13,7d	7,5c	6,3d	116,7c	32,3b
PiO	48,8a	40,4c	30,5b	38,4b	101,5a	183,1a	44,4 ^a
PiT	128,1	265,0	132,1	141,8	183,2	500,1	175,0
PoL	21,3b	24,5b	14,0c	25,9b	16,2c	26,5c	16,3c
PoML	57,9a	62,5a	34,0b	32,1a	82,3a	96,7a	66,4a
PoLL	3,5c	2,0c	5,4d	4,4d	3,1d	1,4d	3,5d
PoO	22,6b	25,4b	38,7a	12,7c	35,2b	55,4b	26,7b
PoT	105,3	114,4	92,2	75,0	136,7	180,2	112,9
PRC	110,8	89,7	99,8	57,2	117,9	112,4	56,8
PT	344,2	469,1	324,1	274,0	437,8	793,3	344,7

*R=Resina L=Lábil), ML=Moderadamente Lábil, LL=Ligeramente Lábil O=Ocluido, PRC= P recalitrante, PT=Fósforo total. Valores seguidos por diferentes letras dentro de cada suelo para Pi y Po son significativamente diferentes para $P < 0,05$ según Tukey.

hasta los 70 días. Los valores de PiR en el día uno mostraron estar inversamente relacionados con la máxima capacidad de adsorción de P de cada suelo, el coeficiente de correlación calculado fue de $r = -0,72$, esto quiere decir que a mayor capacidad de absorción de fósforo en los suelos, menor el valor de la fracción PiR. Duala *et al.* (1996) encontraron resultados parecidos atribuyendo a que gran parte del P soluble aplicado al suelo es adsorbido y precipitado en poco tiempo, haciendo que la concentración del P en la solución del suelo disminuya con el tiempo. Ochwoh *et al.* (2005) atribuyeron este tipo de comportamiento del PiR a la capacidad de adsorción de los suelos. Tchienkoua *et al.* (2010) señalaron que la acumulación del P en los reservorios lábiles del suelo estaría controlada por la capacidad de adsorción.

La fracción PiR en P0 decreció en todos los suelos en el primer día de incubación, excepto en V, (Figura 1 PiR P0) y se prolongó hasta los 70 días en los suelos B2 y R y hasta los 35 días en G. Este

comportamiento, de la fracción PiR, en los suelos sin fertilizar muestra la necesidad de aplicar fertilizantes fosforados al inicio del ciclo de siembra de los cultivos de secano, es decir al inicio de las lluvias.

El PiL en los suelos fertilizados con P mostro incrementos significativos hasta los 35 días de incubación (Figura 1 PiL P1); Linqvist *et al.* (1997) y Ochwoh *et al.* (2005) han reportado un comportamiento parecido del PiL en suelos ácidos. Entre los 35 y 70 días de incubación se encontró una disminución significativa de la fracción PiL en el suelo Pa.

La fracción lábil PiL en el suelo con P0, mostro pocos cambios en el tiempo de incubación (Figura 1 PiL P0), se encontró un pequeño decrecimiento en el primer día para luego retomar los valores cercanos a los originales. Hedley *et al.* (1982) encontraron un resultado parecido del PiL en un suelo incubado sin aplicación de P, este comportamiento ha sido atribuido por Yang *et al.* (2002) a los procesos de adsorción, precipitación o inmovilización del P en formas orgánicas.

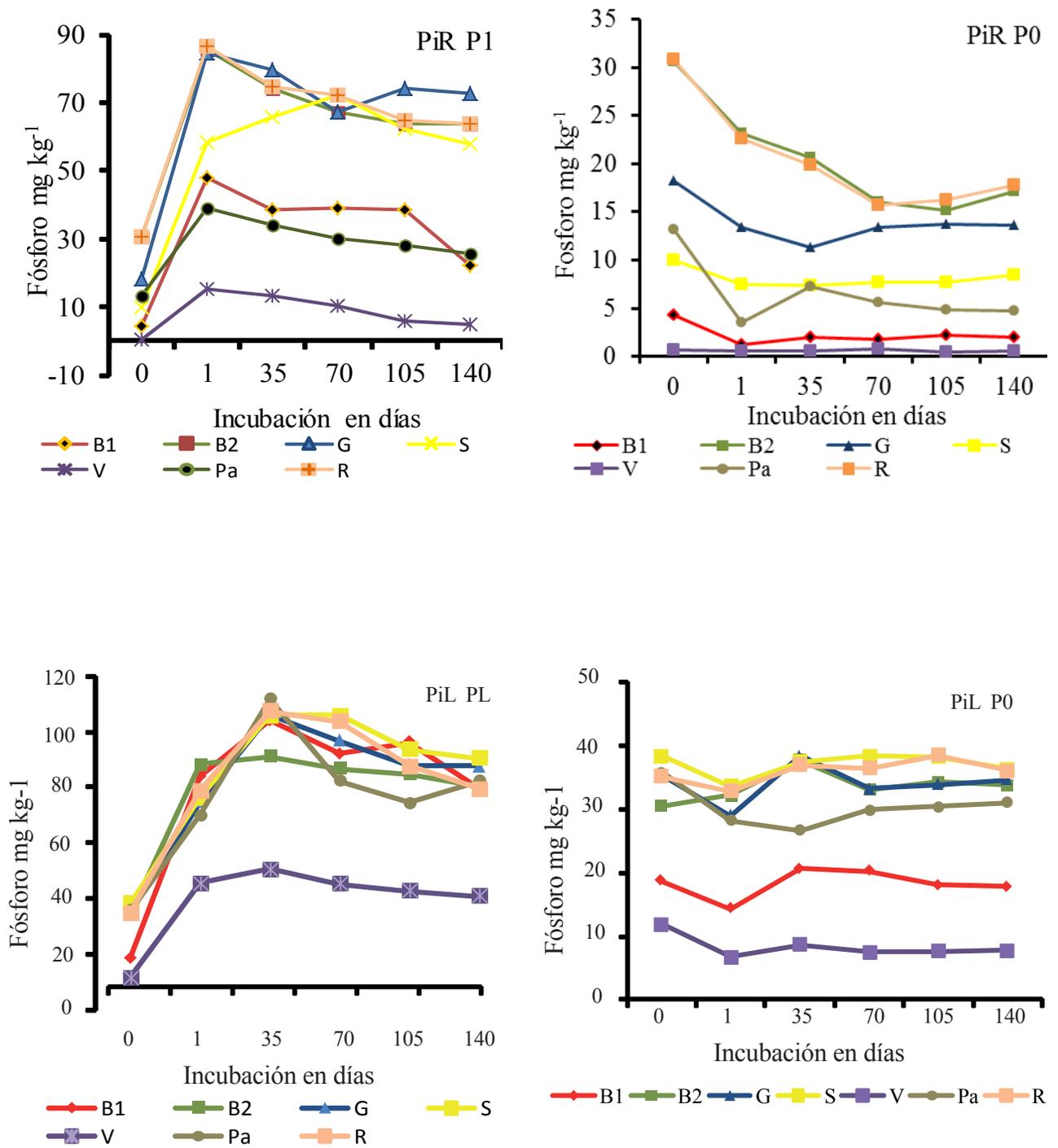


Figura 1. Fracciones de P inorgánico extraídas con resina (PiR) y NaHCO₃ 0,5M (PiL), en los suelos Barinas 1 (B1), Barinas 2 (B2), Guacamaya (G), Silbon (S), Valle La Pascua (V), Paldillo (Pa) y Ramón (R) con o sin aplicación de fósforo e incubados por 140 días

La incubación de los suelos con P dio lugar a un incremento de la fracción PiML (Figura 2 PiML P1) hasta los 70 días en G, S, B1, B2 y R, hasta los 105 en V y en Pa hasta los 140 días. Daroub *et al.* (2004) trabajando con fósforo marcado P^{32} en suelos ácidos mostraron que la incorporación del P a la forma PiML fue rápida, entre 6 y 34 días, esta diferencia en tiempo podría deberse al contenido de Fe y Al de los suelos, ya que es sabido que el P es adsorbido por óxidos e hidróxidos de estos metales.

Cuando no se aplicó P a los suelos la fracción PiML no sufrió cambios significativos en el tiempo de incubación en todos los suelos hasta los 105 días, a los 140 días se registró un incremento pequeño pero significativo en todos los suelos menos en V (Figura 2 PiML P0).

Comparando la Figura 2 PiML P1 con la figura 1 PiR P1 y PiL, se puede observar que el incremento de la fracción PiML coincide con el decrecimiento de las fracciones PiR y PiL a partir de 1 o 35 días de incubación, lo que parece indicar que el P disponible en forma de PiR y PiL estaría pasando a formar compuestos asociados con el Fe y Al (O'Halloran *et al.*, 1987). Estos resultados coinciden con los encontrados por Buehler *et al.* (2002), Gichangi y Mnkeni (2009) y Daroub *et al.* (2004) que trabajaron con diferentes suelos fertilizados con P y mostraron que el P inorgánico aplicado al suelo inicialmente puede acumularse como PiR y pasar luego a convertirse en PiML.

El comportamiento del PiLL en el suelo fertilizado con P en los suelos B1, B2, R y V mostró un incremento significativo en el primer día de incubación, en cambio en G y S los incrementos continuaron hasta los 35 días y en Pa hasta los 70. (Figura 2 PiLL P1). Este comportamiento comparado con la disminución de PiR y PiL con el tiempo sugiere que parte del P de estas fracciones estaría siendo atrapado por las superficies activas de Ca (Hedley *et al.*, 1982).

En el suelo donde no se aplicó fertilizante la magnitud del PiLL en el suelo Pa y B2 fue entre 4 y 6 veces mayor que en los otros cinco suelos (Figura 2 PiLL 0P). Se encontraron pequeños incrementos significativos en el primer día de incubación y a los 35 en los suelos G, S y B2, en los otros cuatro suelos el PiLL no sufrió modificaciones en el tiempo de incubación.

La fracción de PiO es considerada no disponible en el suelo para la planta, donde se aplicó P el PiO se incrementó significativamente en 24 horas de incubación (Figura 3 PiO P1) en los suelos B1, B2, G, V y Pa, un comportamiento parecido del PiO en el término de siete días de incubación ha sido señalado por Buehler *et al.* (2002) usando P^{32} . Con el tratamiento P0 se registró un pequeño incremento significativo en sólo dos suelos B1 y Pa en el primer día de incubación (Figura 3 PiO P0).

La eficiencia del fertilizante fosfatado puede medirse en sus diferentes formas en términos de porcentaje de recuperación del P aplicado al suelo, este parámetro permitiría estimar la magnitud de las fracciones PiR y PiL, consideradas como disponibles para la planta (Hedley *et al.*, 1982; Tiessen y Moir, 1993) y de las formas lábiles PiML y PiLL, no fácilmente disponibles, pero que están en condición de liberar fósforo para restituir a la solución del suelo el usado por la planta.

El cálculo del porcentaje de recuperación de las fracciones de PiR (%PiR) y PiL (%PiL), del P aplicado, permite estimar la eficiencia inicial del fertilizante para proveer P disponible para la planta y, también, al final del período de incubación, el efecto residual del fertilizante en forma de PiML y el PiLL.

El %PiR decreció en los primeros 35 días (Figura 4) en los suelos R, B2, B1 y Pa para luego mantenerse, en G el decrecimiento duró hasta los 70 días y en V hasta los 105 días. Sólo en el suelo S se encontró incremento del %PiR hasta los 70 días. La magnitud de recuperación del PiR en el primer día fue mayor en los suelos G, R, B2 y S y varió entre 25,5% y 35,6%, en cambio en V la recuperación solo alcanzó el 7,3% seguida por Pa con 17,9% y en B1 23,3%. La recuperación de PiR a los 140 días de incubación fue parecida a la encontrada en el primer día.

El comportamiento del %PiL fue diferente al de %PiR, a los 35 días (Figura 5), se encontró un incremento en todos los suelos, excepto en B2, el valor más bajo de 18% correspondió al suelo V y los más altos de aproximadamente 42% a B1 y Pa. A partir de los 35 días se registró una disminución del %PiL, lo que indica que esta forma lábil pudo migrar a otras fracciones menos lábiles. Samadi (2002) también observó un cambio del PiL recuperado y fue atribuido a su paso a formas menos solubles a los 20 días de incubación.

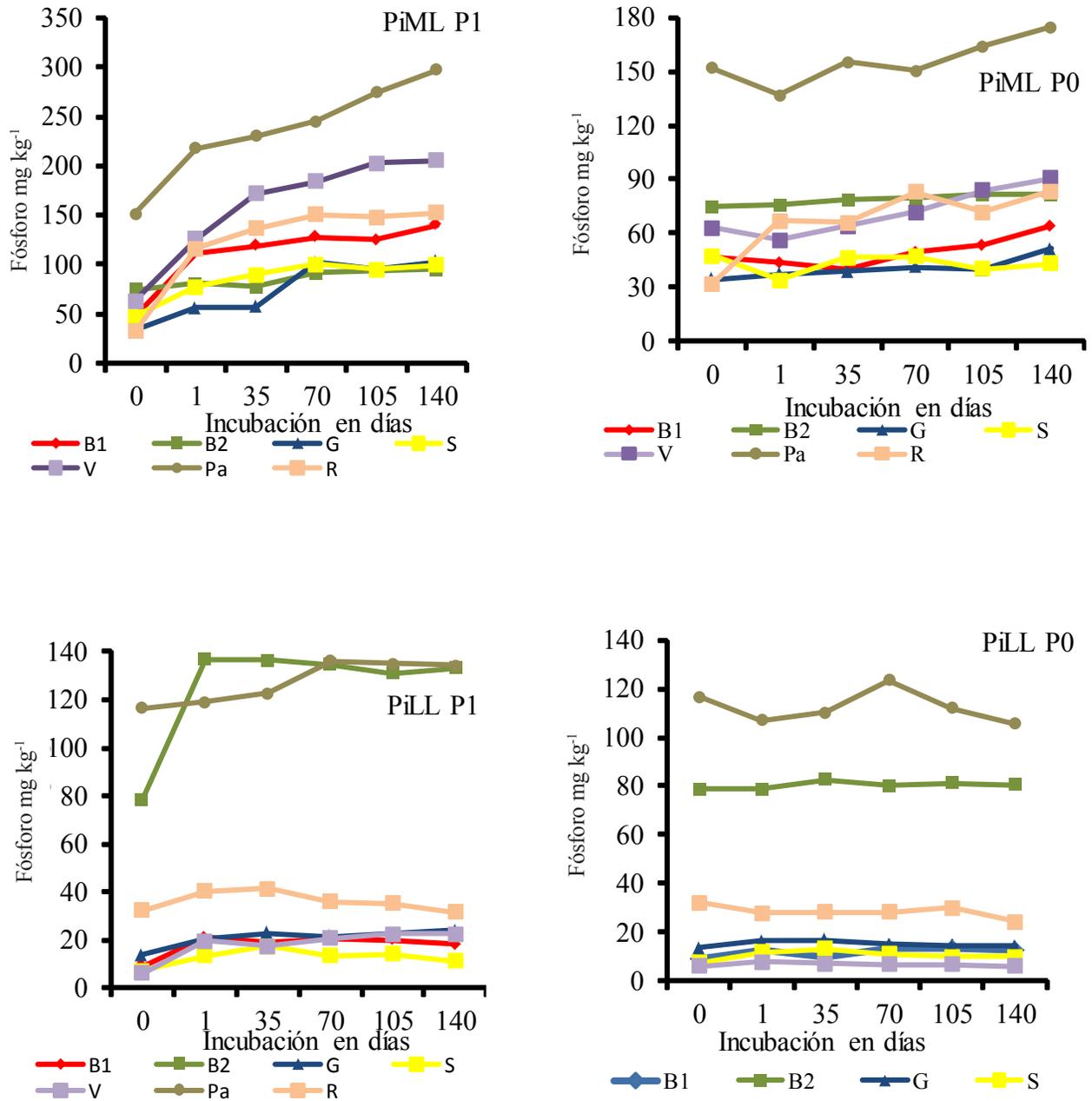


Figura 2. Fracciones de P inorgánico extraídas con NaOH 0,1M (PiML) y HCl 1,0M (PiLL) en los suelos Barinas 1 (B1), Barinas 2 (B2), Guacamaya (G), Silbon (S), Valle La Pascua (V), Paldillo (Pa) y Ramón (R) con o sin aplicación de fósforo e incubados por 140 días.

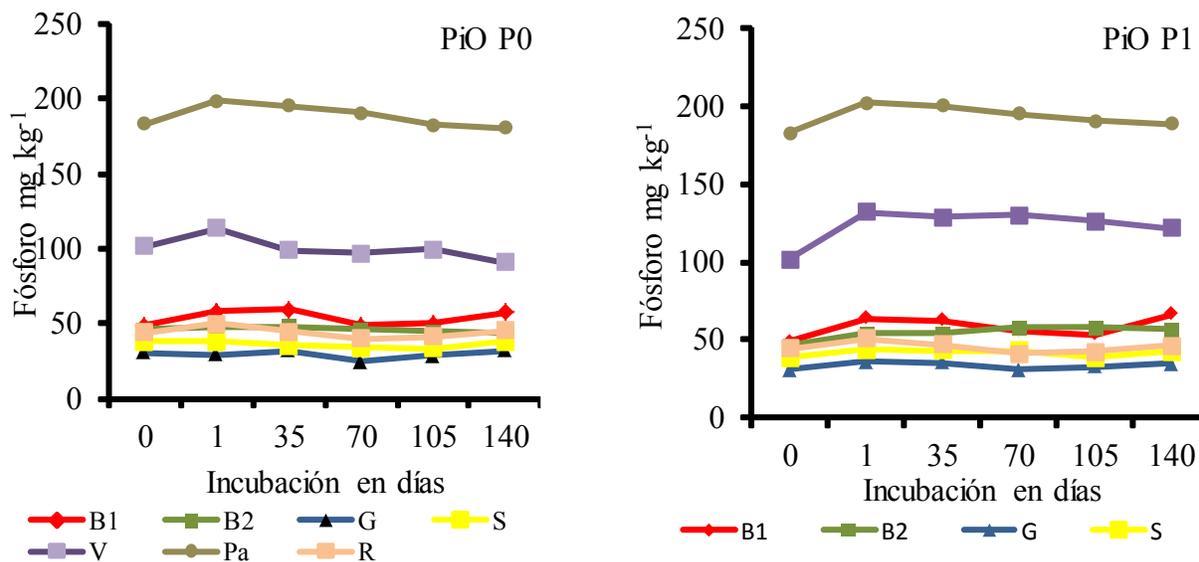


Figura 3. Fracciones de P inorgánico extraídas con HCl concentrado (PiO) en los suelos Barinas 1 (B1), Barinas 2 (B2), Guacamya (G), Silbon (S), Valle La Pascua (V), Paldillo (Pa) y Ramón (R) con o sin aplicación de fósforo e incubados por 140 días.

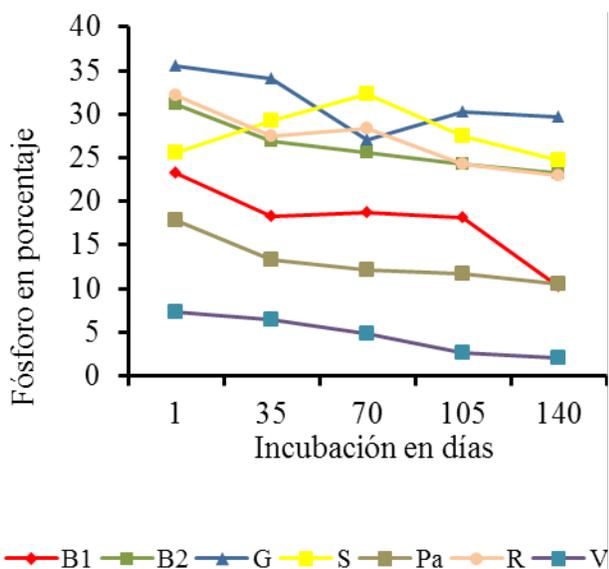


Figura 4. Porcentaje de recuperación de PiR en siete suelos

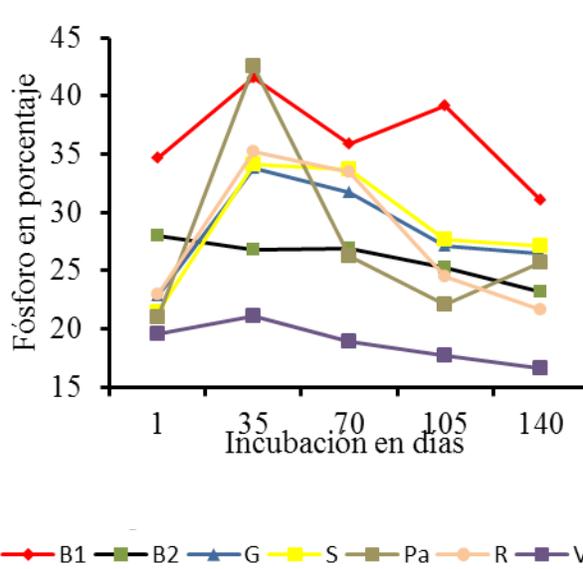


Figura 5. Porcentaje de recuperación de PiL en siete suelos

Las fracciones PiL y PiR han sido consideradas como disponibles en el suelo para la planta por Bowman *et al.* (1978), Hedley *et al.* (1982) y Tiessen y Moir (1993), y se reconoce al PiR como una forma intercambiable libre, debido a que la resina no modifica químicamente la solución del suelo, y que, la extracción del Pi con bicarbonato (PiL) da lugar a cambios químicos que, de alguna manera, se asemejan a la acción de las raíces. Siguiendo este criterio la sumatoria de formas PiR y PiL, disponibles para la planta, podría asumirse como el fósforo disponible actual en el suelo (PiAD). El porcentaje de recuperación de PiAD sería una forma de estimar, en el primer día de incubación, la eficiencia o capacidad del fertilizante aplicado al suelo para liberar P disponible en forma inmediata para la planta y garantizar la nutrición temprana del cultivo para su óptimo desarrollo (Grant *et al.*, 2001) y a los 140 días de incubación, el posible efecto residual del fertilizante.

El comportamiento del PiAD en el primer día de incubación (Figura 6) fue muy parecido en los suelos B1, B2, G, S y R, aproximadamente entre el 50 y 60% del P del fertilizante fue recuperado como disponible para la planta, una clara indicación de la alta solubilidad del fertilizante usado. En el suelo Pa el PiAD recuperado alcanza el 39% y en VP solo el 27%, este comportamiento pareciera estar asociado al alto contenido de arcilla 70%, y de MCA 333 mg kg⁻¹ y muy bajo P disponible inicial en el suelo (Cuadro 2).

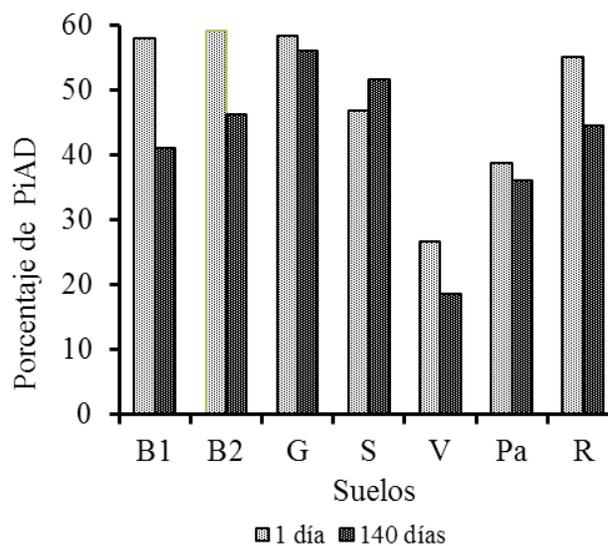


Figura 6. Porcentaje de recuperación de P inorgánico actual disponible en siete suelos

El PiAD a los 140 días varió con los suelos (Figura 6), los valores más bajos correspondieron a los suelos V y Pa con 18,7 y 36,2% respectivamente y los más altos a G con 56,1% y Si con 51,8%, estos datos parecieran indicar que el P residual dependería de las características de los suelos y, por consiguiente, la necesidad de un manejo diferencial de la fertilización con fósforo.

CONCLUSIONES

La obtención de altos rendimientos de cereales cultivados en suelos ácidos, deficientes en P, depende del buen manejo del fertilizante fosfatado, especialmente de la aplicación oportuna que permita la liberación inmediata de las formas disponibles PiR y PiL para la planta a fin de garantizar su nutrición temprana para producir altos rendimientos. Los datos obtenidos en el trabajo soportan la necesidad de la aplicación del fertilizante fosfatado, en el cultivo de maíz, antes o conjuntamente con la siembra para proporcionar a la planta el P disponible desde su temprana edad y, así, garantizar buenos rendimientos.

AGRADECIMIENTO

Al Proyecto Alma Mater de la OPSU y al CDCHT de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, por el financiamiento otorgado

LITERATURA CITADA

- Adeli, A.; K. R. Sistani; M. F. Bal'a; D. E. Rowe. 2005. Phosphorus Dynamics in Broiler litter-amended soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 36:1099-1115.
- Barnhisel, R.; P. M. Bertsch. 1982. Aluminum. P. 275-300. *In: A. L. Page ed. Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties. Agronomy Monograph No 9, Soil Science Society of America, Madison, WI. USA.*
- Bouyoucos, G. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agron. J.* 54:464-465
- Bowman, R. A.; S. R. Olase; F. S. Watanabe. 1978. Green house evaluation of residual phosphate for four phosphorus methods in neutral and calcareous soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42:451-454.

- Buehler, S. A.; I. Oberson; M. Rao; D. K. Friesen; E. Frossard. 2002. Sequential phosphorus extraction of a ^{33}P -Labeled Oxisol under contrasting agricultural systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:868-877.
- Cardoso, I. M.; P. Van der Meer; O. Oenema; B. H. Janssen; T. W. Kuyper. 2003. Analysis of ^{31}P NMR in oxisols under agroforestry and conventional coffee systems in Brazil. *Geoderma* 112:51-70.
- Daroub, S. H.; F. J. Pierce; G. Ellis. 2004. Phosphorus fractions and fate of phosphorus-32 in soils under plowing and non-tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:170-176.
- Duala, M.; A. Ioannou; A. Dimirkou. 1996. Thermodynamics of phosphorus adsorption-desorption by alfisols, entisols, vertisols and inceptisols. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 27:1749-1764.
- Grant, C. A.; D. N. Flaten; D. J. Tamasiewicz; S. C. Shappard. 2001. The important of early season phosphorus nutrition. *Can. J. Plant Sc.* 81:211-224.
- Gichangi, E. M; P. N. S. Mnkeni. 2009. Effects of goat manure and lime addition on phosphate sorption by two soils from the Transkei region South Africa. *Comm. Soil. Sci. Plant Anal.* 40:1-13.
- Hedley, M.; J. Stewart; B. Chauhan. 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 46:970-976.
- Hedley, M. J.; G. J. D. Kirk; M. D. Santos. 1994. Phosphorus efficiency and the forms of soil phosphorus utilized by upland rice cultivars. *Plant and Soil* 158:53-62.
- Hernández, V. I. 2008. Evaluación de la fertilidad fosfórica en diferentes sistemas de producción ubicados en sabanas bien drenadas de Venezuela a través de técnicas de fraccionamiento. *Acta Biol. Venez.* 28:57-68.
- Hernández, I.; M. Bautis. 2005. Cambios en el contenido de fósforo en el suelo superficial por la conversión de sabanas en pinares. *Bioagro.* 17:69-78.
- InfoStat. 2002. Infostat Estudiantil, versión 2,0. Grupo InfoStat/FCA. Universidad Nacional de Córdoba, Ed. Brujas. Córdoba, Argentina.
- Linquist, B. A.; P. W. Singleton; K. G. Cassman. 1997. Inorganic and organic phosphorous dynamic during a build up and decline of available phosphorous in an Ultisol. *Soil Sci.* 162:254-264.
- McKenzie, R. H.; E. Bremer. 2003. Relationship of soil phosphorus fractions to phosphorus soil tests and fertilizer response. *Can. J. Soil Sci.* 83:443-449.
- Murphy, J.; J. Riley. 1962. A modified single method for determination of phosphates in natural waters. *Anal. Chem. Act.* 27:31-36.
- Ochwoh, V.; A. Claassens; P. Jager. 2005. Chemical changes of applied and native phosphorus during incubation and distribution into different soil phosphorus pools. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 36:535-556
- O'Halloran, I. P.; J. W. Steward; R. G. Kachanuski. 1987. Influence of texture and management practices on the forms and distribution of soil phosphorus. *Can. J. Soil Sci.* 67:147-167.
- Olsen, S. R.; C. V. Cole; F. S. Watanabe; L. A. Dean. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. *USDA Cir.* 939. EE.UU.
- Olsen, S. R.; F. S. Watanabe. 1957. A method to determine a phosphorus adsorption maximum in soils as measured by the Langmuir Isotherm. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 21:144-149.
- Ramírez, R.; T. Rodríguez; A. Millán; C. Hernández; E. Guzmán; J. Tenías; A. Chirinos. 1987. Relación del fosforo disponible del suelo con el requerimiento y respuesta del sorgo a la fertilización con este elemento. *Agronomía Trop.* 37:85-98
- Ramírez, R.; M. D. Beg; O. Colmenares; E. Meléndez; P. Marbal; F. Blanco; E. Guzmán; C. Hernández; A. Chirinos. 1988. Relación entre la respuesta del maíz a la aplicación del fosforo y el P asimilable del suelo. *Agronomía Trop.* 38:5-20.

- Ramírez, R. 1989. Relación entre el fosforo del suelo con la respuesta de la yuca a la fertilización fosfatada. *Agronomía Trop.* 39:115-130.
- Ramírez, R.; J. Tenías; L.C. de Silva; T. Rodríguez; A. Chirinos. 1989a. Calibración de cuatro métodos de análisis de suelo con la respuesta del maní a la fertilización con fósforo *Agronomía Trop.* 39:5-21.
- Ramírez, R.; D. Morales. 1989. Comparación de cuatro métodos de análisis del fosforo del suelo para estimar el requerimiento de P_2O_5 por el tomate (*Lycopersicon esculentum*) *Agronomía Trop.* 39:79-94.
- Rhoades, J. 1982. Cation Exchange Capacity. p. 178-190. *In*: A. L. Page (ed). *Chemical and Microbiological Properties*. Agronomy Monograph No 9. Soil Science Society of America. Madison, WI. USA.
- Samadi, A. 2002. Changes in available phosphorus with time in contrasting calcareous soils with mediterranean type of climate. *Options Méditerranéennes. Série A* 50:205-211.
- Tchienkoua, W.; W. Zech; N. Sanginga. 2010. Inorganic phosphorus fractions dynamics following phosphorus application on maize in acid soils. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.* 8:793-800.
- Tiessen, H.; J. Moir. 1993. Characterization of available P by sequential extraction p.75-86. *In*: M.R. Carter (ed) *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers.
- Yang, J. E.; C. A. Jones; H. J. Kim; J. S. Jacobsen. 2002. Soil inorganic phosphorus fractions and Olsen-P in Phosphorus-responsive calcareous soils: Effects of fertilizer amount and incubation time. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 33: 855-871.
- Walkley, A.; I. A. Black. 1934. An examination of the Degthareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 27:29-38.
- Zheng, Z.; L. E. Parent; J. A. Macleod. 2003. Influence of soil texture on fertilizer and soil phosphorus transformations in Gleysolic soils. *Can. J. Soil Sci.* 83:395-403.