

## Fracciones de fósforo en cinco suelos incubados durante ciento cuarenta días con y sin aplicación de fosfatado

Omaira Sequera<sup>1</sup>, Ricardo Ramirez<sup>2\*</sup>, Neudis Subero<sup>3</sup> y Julio Parra<sup>4</sup>

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

<sup>4</sup>Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Apdo. 4579. Maracay 2101. Aragua, Venezuela

### RESUMEN

La producción de maíz y sorgo en Venezuela tiene lugar en suelos, por lo general, pobres en fósforo (P). El conocimiento del destino de los fertilizantes fosfatados aplicados a estos suelos permitirá desarrollar sistemas de manejo eficientes de los fosfatos. El objetivo de este trabajo fue evaluar los cambios de las fracciones de P en cinco suelos de diversos estados del centro occidente del país, incubados con o sin la adición de fosfatos en condiciones controladas. A cada suelo se aplicó una dosis de P de 200 mg kg<sup>-1</sup> (1P) más un testigo sin P (0P). Los suelos se incubaron por 140 días conservando la humedad entre 20 y 80% de la capacidad de campo. Se tomaron muestras de suelo en el primer día de incubación y luego cada 35 días. Las fracciones de P en las muestras se analizaron de acuerdo con el método de fraccionamiento secuencial. Las fracciones de P inorgánico (Pi) recuperadas variaron con los suelos, en el primer día de incubación el porcentaje de recuperación del Pi extraído con resina (PiR) varió entre 7,09 y 40,05% y entre 18,58 y 33,54% para Pi inorgánico lábil (PiL). A los 140 días la recuperación como PiR fue de 6,38 a 35,63% y para PiL de 23,12 a 37,42%. La recuperación como Pi moderadamente lábil (PiML) varió entre 10,65 y 47,67% el primer día y entre 10,23 y 54,99% el último día. Una porción considerable del P aplicado al suelo se mantuvo disponible para la planta en el proceso de incubación.

**Palabras clave:** Fósforo inorgánico, fósforo orgánico, fósforo recuperado, fracciones de fósforo.

### Fractions of phosphorus in five soils incubated by one hundred and forty days

### ABSTRACT

Maize and sorghum production in the country takes place in soils, generally poor in phosphorus (P). Knowledge of the fate of phosphate fertilizers applied to these soils will allow developing efficient management systems of phosphates. The objective of this study was to evaluate changes in fractions of P in five soils. To each soil it was applied 200 mg P kg<sup>-1</sup> (1P) and pots without P were maintained as control (0P). The soils were incubated for 140 days keeping the humidity between 20 and 80% of field capacity. Soil samples were taken in the first

---

\*Autor de correspondencia: Ricardo Ramírez

E-mail: abisam28@gmail.com

day of incubation and then every 35 days. P fractions in samples were analyzed according to the sequential fractionation method. The recovered inorganic P fractions varied with soils. Resin inorganic P (PiR) and labile (PiL) fractions are considered available to the plant, on the first day of incubation recovery rates for PiR ranged from 7.09 to 40.05% and for PiL from 18.58 to 33,54%. At 140 days recovery as PiR was 6.38 to 35,63% and for PiL 23.12 to 37.42% . Recovery as moderately labile Pi (PiML) varied between 10.65 and 47,67% the first day and 10.23 and 54.99% in the last day. A considerable portion of the P applied to the soil remained available for the plant in the incubation process.

**Key words.** Inorganic phosphorus, organic phosphorus, recovery phosphorus, phosphorus fractions.

## INTRODUCCIÓN

La agricultura en Venezuela se desarrolla, en general, en suelos con variables condiciones de acidez y de contenido de fósforo (P), por lo cual, el conocimiento del destino de los fertilizantes fosfatados en los suelos es de importancia para el buen manejo de éste nutriente, en especial cuando se trata de la época y forma de aplicación, en los cultivos anuales que dependen de las lluvias.

Es importante identificar las dosis de P más eficientes para los diferentes cultivos, así como los métodos de aplicación a los suelos, pero también disponer de información de los efectos y cambios que sufre el P en los suelos.

El fósforo es con frecuencia el nutriente más limitante en los suelos ácidos tropicales (Buehler *et al.*, 2002), en el país podría considerarse que es el segundo después del nitrógeno. El manejo sostenible de los ecosistemas tropicales implica el conocimiento de la dinámica del P en el sistema suelo-planta y, especialmente, el destino del P fertilizante a corto y largo plazo (Friesen *et al.*, 1997). El P en el suelo se encuentra bajo diferentes formas o fracciones inorgánicas y orgánicas, las cuales tienen diferente grado de solubilidad y distribución lo que determinaría su disponibilidad para la planta (Adeli *et al.*, 2005).

Los fertilizantes fosfatados tienen una alta influencia sobre la distribución de las fracciones de fósforo en el suelo. Zamuner y Culot (1999) encontraron que la aplicación de altas dosis de P al suelo dieron lugar a un aumento de la fracción más lábil de P, un año después de la fertilización. Henríquez y Killorn (2005) señalaron que los cambios entre las formas disponibles y no disponibles del P en el suelo tuvieron lugar 15 días después de

la aplicación del fertilizante al suelo. Hartono *et al.* (2006) evaluaron los cambios del P aplicado a suelos ácidos y consiguieron que después de 90 días de incubación las mayores fracciones correspondieran a las formas extraídas con resina, bicarbonato de sodio e hidróxido de sodio.

El P de los fertilizantes fosfatados solubles es rápidamente adsorbido por las superficies de los óxidos de Fe y Al, seguida por una inmovilización más lenta bajo otras formas (Hedley *et al.*, 1994, Linnquist *et al.*, 1997), especialmente en los suelos ácidos, pero el P aplicado a estos suelos, cultivados por muchos años, no solamente pasa a formas inorgánicas de Al y Fe sino que también se convierte a formas orgánicas que son retenidas en el suelo (Zheng *et al.*, 2003).

Las plantas usan solo entre 15 y 30% del fósforo aplicado al suelo, por lo tanto, es necesario entender la dinámica del P en el sistema suelo-planta y conocer la distribución y destino del fósforo aplicado (Syers *et al.*, 2008). Los métodos de fraccionamiento permiten determinar las fracciones de P y conocer las que son disponibles a corto, mediano y largo plazo.

Hedley *et al.* (1982) propusieron una extracción secuencial de P que permite su caracterización en diferentes fracciones inorgánicas y orgánicas. Tiessen y Moir (1993) argumentaron que el anterior método no extrae una parte considerable del fósforo orgánico y para mejorar este problema propusieron una extracción reagrupando las fracciones de P, con base a sus transformaciones.

El objetivo de éste trabajo fue evaluar los cambios de las fracciones de P en cinco suelos ácidos, bajo diferentes sistemas de producción, e incubados por ciento cuarenta días con y sin aplicación de fertilizante fosfatado en condiciones controladas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar el trabajo se tomaron muestras de suelos compuestas por 15 sub muestras, a una profundidad de 0 a 20 cm en una hectárea aproximadamente. Los suelos se secaron al aire, se trituraron y pasaron por un tamiz de 2 mm.

Los suelos se ubicaron en cinco diferentes estados (Cuadro 1), el tiempo y años de cultivo fue variable, desde cinco años el de Portuguesa (Pr) con caña de azúcar, doce el de Uribeque (Ur) con maíz-pastoreo, catorce el de Violetas (Vi) con maíz, quince el de Camoruco (Cm) con Pastizal hasta veinte años el de Cubiro (Cu) con papa.

La textura de los suelos se determinó por el método de Bouyoucus, el pH en suelo-agua (1:2,5), Al intercambiable con la solución extractora de KCl 1N (Barnhisel y Bertsch, 1982), la materia orgánica por medio de Walkley y Black (1934), el Ca y la CIC con acetato de amonio (Thomas, 1982), y el hierro fue extraído con una solución de DTPA relación suelo extractante 1:2 (Ling y Karamanos, 2013).

Para el experimento se implementaron dos tratamientos, un testigo sin aplicación de P (0P) y un segundo con la aplicación de 200 mg P por kilogramo de suelo (P1) en forma de superfosfato triple (46% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). El fósforo se aplicó a una masa de suelo de 50 kg, cuidando de homogeneizar la mezcla. De cada porción de suelo, P1 y P0, se pesaron 5 kilogramos en potes plásticos para su incubación. Los potes se colocaron en un invernadero, enfriado con cortina de agua y la temperatura varió entre 23 y 35 °C. La humedad de los suelos se mantuvo entre 20 y 80% del agua disponible, de acuerdo con las curvas de retención de humedad determinadas para cada suelo. Para el riego se usó agua destilada. El tiempo de incubación fue de 140 días.

El diseño experimental completamente al azar, correspondió a un arreglo factorial de dos tratamientos de P (0P y 1P), cinco suelos y tres repeticiones.

Se tomaron muestras de suelo a los 1, 35, 70, 105 y 140 días de incubación, usando un tubo metálico de 2,5 cm de diámetro, se secaron al aire, se trituraron y pasaron por un tamiz de 2 mm y se guardaron para su posterior análisis.

Las fracciones de fósforo de los suelos se extrajeron, en forma secuencial, por medio del procedimiento propuesto por Tiessen y Moir (1993) siguiendo el siguiente esquema:

P en resina (PiR): Se pesaron 2,0 g de suelo en un tubo de centrifuga, 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 se centrifugó por 10 minutos, en el sobrenadante se determinó fósforo.

P inorgánico lábil (PiL) y P orgánico lábil (PoL): Al suelo restante se agregó 20 ml NaHCO<sub>3</sub> 0,5 M (pH 8,5), seguido por 16 horas de agitación; en una parte del sobre nadante se determinó el PiL y en la otra el PiT, mediante digestión húmeda con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, el PoL se calculó por diferencia.

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 y 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 y en el sobrenadante se determinaron las dos fracciones.

**Cuadro 1.** Localización y clasificación taxonómica de los suelos, cultivo y años de cultivo.

Suelo	Localidad	Taxonomía	Cultivos	Años
Portuguesa (Pr)	Ospino Edo. Portuguesa	Inceptisol	Caña de azúcar	2
Uribeque (Ur)	Edo. Yaracuy	Alfisol	Maíz-pastoreo	12
Camoruco (Cm)	San Carlos Edo. Cojedes	Alfisol	Pastizal	15
Violeta (Vi)	Infante Edo. Guárico	Ultisol	Maíz	14
Cubiro (Cu)	Cubiro Edo. Lara	Ultisol	Papa	20

P inorgánico ocluido (PiO) y P orgánico ocluido (PoO): Al suelo restante se agregó 10 ml HCl concentrado, puesto en baño maría, lavado con agua y centrifugación por 15 minutos y en el sobrenadante se determinaron las dos fracciones.

P inorgánico recalcitrante (PRC): El suelo restante fue digerido con  $H_2SO_4$  concentrado y  $H_2O_2$  y en el extracto se determinó PRC.

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

El porcentaje de recuperación del P aplicado al suelo, en cada fracción, se calculó usando la ecuación:  $\%P_{rec} = ((1P-0P)/200) \times 100$ , donde 1P es el P extraído del suelo con aplicación de P, 0P es el P extraído del suelo sin aplicación de P.

El P inorgánico total (PiT) y el P orgánico total (PoT) se calcularon sumando las respectivas fracciones de P.

El análisis estadístico de los datos se hizo con la ayuda del programa InfoStat, 2002. Para la comparación de las medias en el tiempo de incubación y la comparación entre suelos, se usó la prueba de Tukey para  $P \leq 0,05\%$ .

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Fósforo en suelos sin incubar

Los suelos Pr, Vi y Cm mostraron bajos contenidos de fósforo disponible variando entre 6 y 13  $mg\ kg^{-1}$  (Cuadro 2), en cambio Ur resultó con alto contenido de 52  $mg\ kg^{-1}$  y el Cu con uno muy alto de 265  $mg\ kg^{-1}$ . El calcio en Vi fue bajo, en los otros suelos varió entre medio y alto. En cuatro suelos el contenido de materia orgánica mostró valores entre 0,94 y 1,91; solo en Cu alcanzó 3,53%, la arcilla en éste suelo fue la más alta (68%), en los otros suelos varió entre 6 y 16%, este comportamiento se reflejó en la CIC. El pH se ubicó en el rango de acidez, entre 4,37 y 5,26, siendo Cm y Vi los suelos más ácidos. Los niveles de Al son bajos lo que indica que no hay problemas de toxicidad. El Fe se incrementó con el pH dentro de los límites normales.

En los suelos sin incubar, el fraccionamiento secuencial mostró que el fósforo inorgánico total (PiT) fue altamente variable (Cuadro 3). El suelo Cu

resultó con el valor más alto de 2 031,3  $mg\ kg^{-1}$  y Vi el más bajo con 46,2  $mg\ kg^{-1}$ , esta variación pudiera ser atribuida a las distintas prácticas de manejo de los fertilizantes por los productores, en los diferentes sistemas de producción. El suelo Cu ha sido cultivado con papa por 20 años y recibió altas dosis de P en forma de fertilizantes y abonos orgánicos, en cambio en Vi se cultivó maíz por 14 años con aplicaciones de fosfatos en menores proporciones. El fósforo orgánico total (PoT) mostró un comportamiento parecido al de PiT (Cuadro 3), en todos los suelos se encontró que el PoT fue menor al PiT, excepto en Cm donde PoT fue muy parecido a PiT.

El P total (PT) varió desde 159,4 en Vi hasta 2 576,2  $mg\ kg^{-1}$  en Cu (Cuadro 3), siendo estos valores comparables con los encontrados para suelos ácidos por otros autores (McKenzie y Bremer 2003, Hernández y Bautis, 2005). Según Frossard et al. (2000) el PT en los suelos puede variar, en general, entre 100 y 3 000  $mg\ kg^{-1}$ .

El PiR en los cinco suelos fue la fracción menos abundante, por consiguiente la que menos contribuye al PiT, este comportamiento coincide por lo publicado por McGrath *et al.* (2001) y Hernández y Bautis (2005) en suelos ácidos.

La fracción PiL fue significativamente mayor a PiR en todos los suelos (Cuadro 3). El PiL junto con el PiR son considerados disponibles para la planta (Hedley *et al.*, 1982; Tiessen y Moir, 1993). En términos de porcentaje del PiT, la sumatoria de PiR y PiL fue de 7,2%, 9,5%, 12,6%, 27,3% y 28,9% para Pr, Cm, Cu, Vi y Ur respectivamente, lo que parece indicar que, en los suelos estudiados, menos del 30% del PiT estaría disponible en el suelo para la planta.

Se considera que las fracciones de P moderadamente (PiML) y ligeramente lábiles PiLL), no son rápidamente disponibles en el suelo para las plantas sino a mediano o largo plazo (Schoenau *et al.*, 1989). La fracción PiML en todos los suelos fue significativamente mayor a PiLL (Cuadro 3). En términos de porcentaje, PiML representó entre el 18,6 y 50,0% del PiT en cambio la forma PiLL solo 7,4 a 10,3 %, estos valores son más altos que el 1,0% encontrado por duPreez y Classens (1999).

**Cuadro 2.** Análisis físico-químico de los suelos Portuguesa (Pr), Uribeque (Ur), Camoruco (Cm), Violetas (Vi) y Cubiro (Cu) usados en el experimento.

Suelo	Parámetros químicos y físicos								
	P*	Ca*	Fe*	Al*	M O°	Arcilla°	Textura	pH	CIC ´
Pr	13	304	89	0,36	1,91	16	F	5,26	12,6
Ur	52	372	40	0,28	1,36	14	Fa	5,40	5,2
Cm	6	261	142	0,20	1,27	8	Fa	4,37	4,4
Vi	11	56	115	0,66	0,94	6	aF	4,50	4,1
Cu	265	834	351	0,54	3,53	68	A	5,10	21,9

\* mg kg<sup>-1</sup>

° Porcentaje

´ cmol

kg

En los suelos Pr, Cm, y Vi la fracción más abundante fue PiO y en Ur y Cu la forma PiML, este comportamiento coincide por lo encontrado por Cardoso *et al.* (2003) en suelos ácidos donde la fracción más abundante de P correspondió a PiO seguida por PiML.

Las fracción más abundante de P orgánico y significativamente mayor a las otras fracciones fue el PoML en los suelos Pr, Ur, Cm y Cu, en el caso

del suelo Vi la fracción PoO fue la más abundante (Cuadro 3). La fracción menos abundante en todos los suelos fue PoLL.

El PiT fue mayor que el PoT en todos los suelos, excepto en Cm, (Cuadro 3) y representó entre el 29 y 79% del P total, este comportamiento coincide con el señalado para suelos ácidos en el país por Hernández y Bautis (2005).

**Cuadro 3.** Fracciones de fósforo inorgánico (Pi) y fósforo orgánico (Po) en mg kg<sup>-1</sup> en los suelos no incubados de Portuguesa (Pr), Uribeque (Ur), Camoruco (Cm), Violetas (Vi) y Cubiro (Cu)

Fracciones	Pr	Ur	Cm	Vi	Cu
PiR*	3,4 e	42,0 d	0,8d	3,2 d	31,8 e
PiL	15,9 d	64,8 c	7,8 c	9,4 c	225,0 c
PiML	81,9 b	125,0 a	16,8 b	11,7 b	1016,0 a a
PiLL	37,9 c	28,5 e	7,8 c	3,4 d	208,6 d
PiO	127,9 a	110,6 b	57,2 a	18,5 a	550,5 b
PiT	267,0	370,0	90,4	46,2	2031,3
PoL	23,6 c	13,8 b	15,1 b	6,0 c	30,4 c
PoML	72,1 a	55,9 a	75,0 a	13,9 b	326,9 a
PoLL	2,5 d	6,7 c	3,8 c	1,6 d	3,4 d
PoO	38,6 b	49,2 a	15,6 b	18,0 a	52,3 b
PoT	136,8	125,6	109,4	39,4	413,1
PRC	121,3	84,0	104,0	73,7	132,0
P Total	525,1	580,5	303,8	159,4	2576,2

\*R=Resina L=Lábil (NaHCO<sub>3</sub>), ML=Moderadamente Lábil, LL=Ligeramente Lábil, O=Ocluido, (PRC= P recalitrante, PT= Fósforo total (PiT+PoT). Valores seguidos por diferentes letras dentro de cada suelo para Pi y Po son significativamente diferentes según prueba de Tukey (P≤0,05).

## Fracciones de P inorgánico en suelos incubados

El comportamiento de las fracciones de fósforo inorgánico durante el período de incubación varió con los suelos. Donde no se aplicó fósforo, la fracción PiR en los suelos Cu, Ur y Pr (Figura 1 PiR 0P), decreció significativamente en el primer día de incubación, en términos de porcentaje éste decrecimiento correspondió a 67,00%, 51,72% y 26,50% respectivamente. Solo en los suelos Ur y Cu el decrecimiento del PiR se extendió hasta los 35 días. La magnitud inicial del PiR en 0P fue variable siendo notablemente mayor en Ur seguido por Cu, Vi, Pr y Cm.

Cuando se aplicaron 200 mg kg<sup>-1</sup> de P a los suelos, la fracción PiR se incrementó significativamente en Ur, Vi, Cm y Pr al término de 24 horas, solo en Cm el incremento de PiR llegó hasta los 35 días de incubación, para luego decrecer con el tiempo (Figura 1 PiR 1P). Doula *et al.* (1996) señalaron que una cantidad considerable del P aplicado al suelo es usualmente adsorbido y precipitado en poco tiempo, por lo cual la concentración de P en la solución del suelo disminuye con el tiempo. Ochwoh *et al.* (2005) también encontraron que el P extraíble decrecía significativamente con el tiempo de incubación.

En el suelo Cu la concentración de PiR decreció desde el inicio de la incubación hasta los 35 días para luego estabilizarse (Figura 1 PiR 1P), este suelo es alto en arcilla y materia orgánica (Cuadro 2) es conocido que el incremento de la sorpción de P está relacionada con los suelos arcillosos altos en materia orgánica (Ochwoh *et al.*, 2005).

La recuperación de P en forma de PiR en los suelos donde se aplicó este nutriente fue mayor en el primer día de incubación (Figura 2), solo en el suelo Cm la recuperación duró 35 días. El mayor porcentaje de recuperación de P (%P<sub>rec</sub>) correspondió al suelo Vi con 40,85% seguido por Ur 27,17%, Cm 20,95%, Pr 14,19% y Cu 7,09%.

La fracción lábil PiL, extraída con NaHCO<sub>3</sub>, en el suelo Cu sin aplicación de P resultó ser la más alta (Figura 1 PiL 0P), esta fracción en el término

de un día decreció significativamente. PiL en Ur fue la segunda fracción más abundante y los niveles más bajos correspondieron a los suelos Pr, Vi y Cm. Este comportamiento se podría atribuir al mayor contenido de Fe de éstos últimos suelos (Cuadro 2), ya que es conocido que el NaHCO<sub>3</sub> extrae principalmente el P adsorbido por las superficies activas de los compuestos de Fe, Al y Ca (Linquist *et al.*, 1997).

En el suelo Cu fertilizado con P el PiL recuperado fue aproximadamente el doble o más alto que en los otros suelos (Figura 1 PiL 1P) debido posiblemente a la riqueza inicial de P en este suelo (Cuadro 2), parte del P aplicado fue convertido a PiL en el término de 1 día en Cu, en los otros cuatro suelos la transformación del P aplicado en PiL alcanzó el máximo nivel a los 35 días.

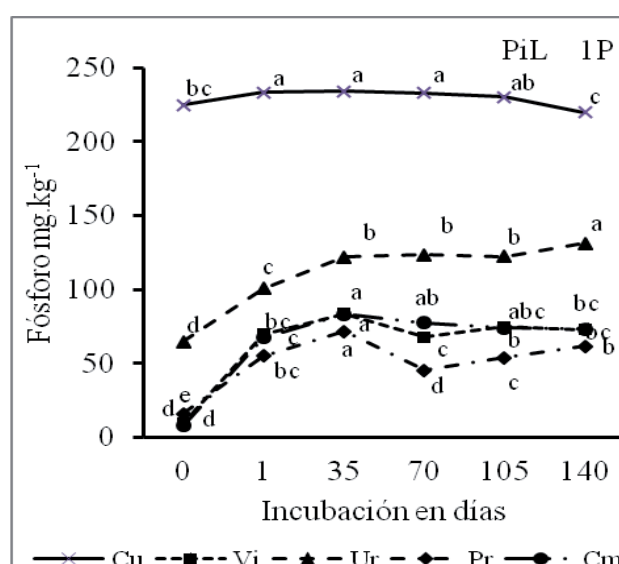
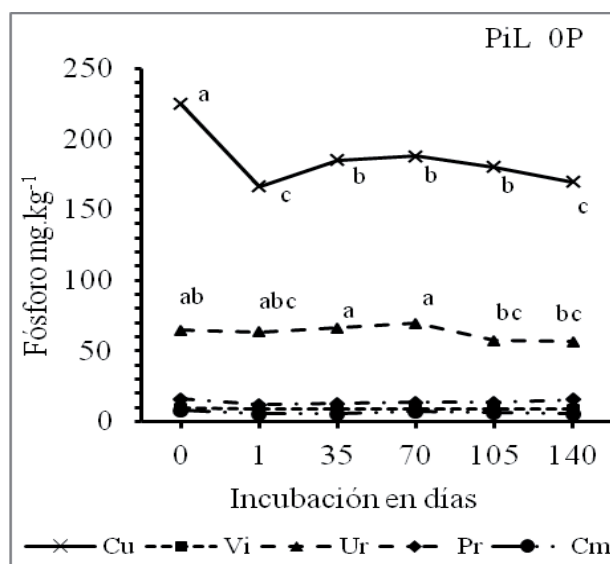
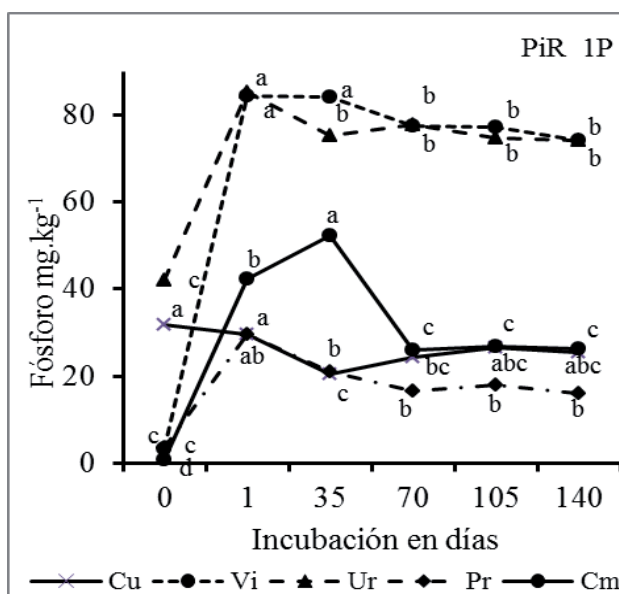
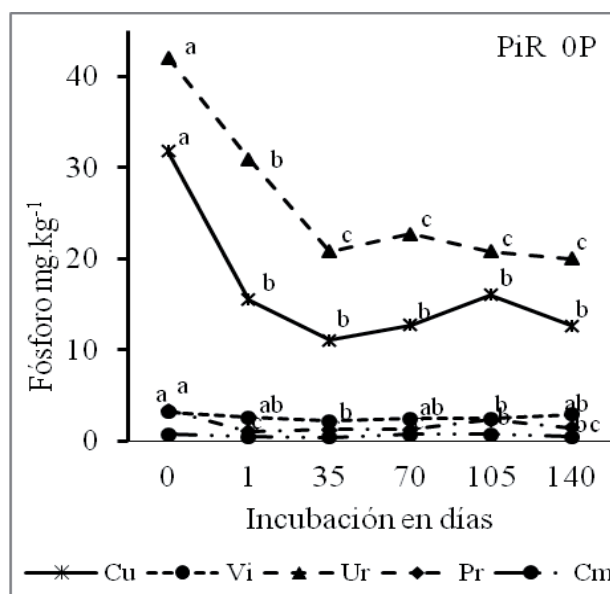
El P<sub>rec</sub> de PiL en el término de un día fue de 33,40% en Cu, 30,15% en Vi, 31,04% en Cm, 21,46% en Pr y 18,58% en Ur (Figura 2), este comportamiento está de acuerdo con lo encontrado por Ochwoh *et al.* (2005) en suelos con pH de 6,84 y 5,87 donde el %P<sub>rec</sub> de la fracción lábil fue 30,0% al término de un día de incubación.

Es reconocido que las diferentes fracciones de P en el suelo no son todas disponibles para la planta, solo PiR y PiL son consideradas rápidamente disponibles en el suelo (Hedley *et al.*, 1982). PiR es una forma intercambiable libre, ya que la resina no modifica químicamente la solución del suelo y la forma PiL solo introduce pequeños cambios químicos que semejan la acción de las raíces (Tiessen y Moir, 1993). Por lo tanto, la sumatoria de las fracciones PiR y PiL, recuperadas del P aplicado al suelo, constituirían el Pi actual disponible (PiAD) en el suelo para la planta (Subero *et al.*, 2016).

Al término del primer día de incubación, el porcentaje de recuperación de PiAD más bajo de 35,7% correspondió al suelo Pr y el más alto de 71,0% a Vi (Cuadro 4). Al final del período de incubación de 140 días la recuperación de P en términos de porcentaje en forma de PiAD variaron entre 30,4% para Pr y 61,8% para Vi. Estos datos muestran el potencial que tendría cada suelo para convertir el P aplicado como fertilizante a formas disponibles al

inicio de un ciclo de cultivo, lo que garantizaría una nutrición temprana eficiente del cultivo.

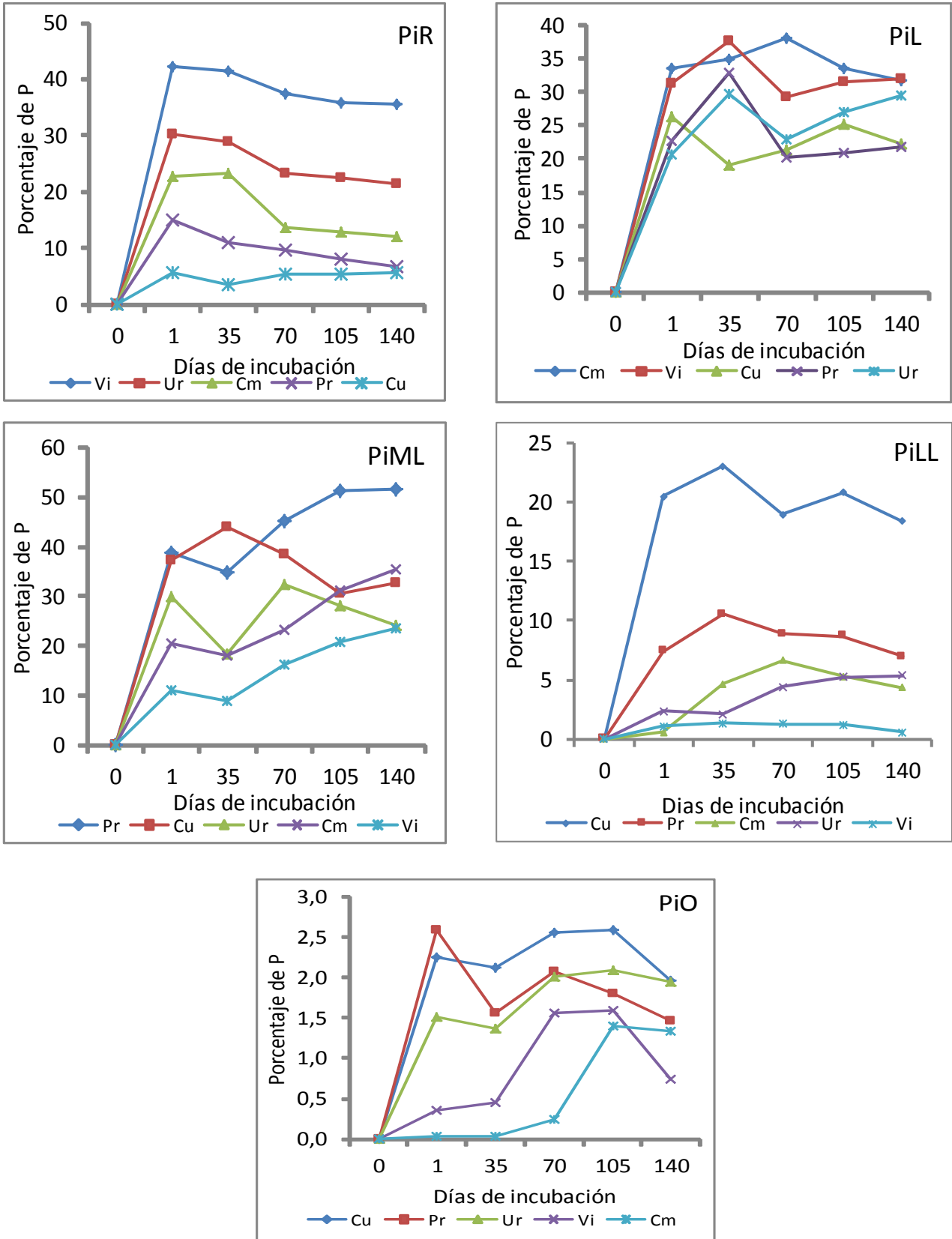
La fracción PiML en Cu con OP no mostró cambios sino hasta el final del período de incubación, con incrementos significativos (Figura 3 PiML OP). Esta fracción en Cu fue aproximadamente 6 o más veces mayor que en los otros cuatro suelos, en los cuales se observaron pequeños cambios en el curso del experimento.



**Figura 1.** Fracciones de P inorgánico, PiR y PiL en los suelos sin aplicación de P (0P) y con aplicación de 200 mg de P kg<sup>-1</sup> (1P) en los suelos Cubiro (Cu), Violeta (Vi), Uribeque (Ur), Portuguesa (Pr) y Camoruco (Cm), durante el período de incubación de 140 días. Letras iguales en la misma línea no son significativamente diferentes, según prueba de Tukey ( $P \leq 0,05$ ).

El comportamiento de PiML con la aplicación de P en el suelo Cu fue parecido a la encontrada con OP (Figura 3 PiML 1P y OP). La transformación del P aplicado al suelo en la forma PiML mostro ser muy lenta en el curso de la incubación.

El porcentaje de P recuperado en forma de PiML fue variable (Figura 2), las mayores tasas de recuperación correspondieron a Cu seguido por Pr, Ur, Cm y Vi. Los mayores porcentajes de



**Figura 2.** Porcentajes de recuperación de las fracciones de fósforo en los suelos Violeta (Vi), Uribeque (Ur), Camarucu (Cm), Portuguesa (Pr) y Cubiro (Cu).



**Cuadro 4.** Porcentaje de recuperación del fósforo aplicado al suelo en forma de fracciones disponibles sumadas (PiR+PiL) PiAD y lábiles (PiML+PiLL) PiAL en los suelos Cubiro (Cu), Uribeque (Ur), Portuguesa (Pr), Violetas (Vi) y Camoruco (Cm)

Porcentaje de PiAD					
Tiempo	Cubiro	Uribeque	Portuguesa	Violetas	Camoruco
1 día	40,6	45,9	35,7	71,0	52,0
140 días	31,5	64,3	30,4	67,8	46,7
Porcentaje de PIAL					
Tiempo	Cubiro	Uribeque	Portuguesa	Violetas	Camoruco
1 día	73,8	28,9	43,5	11,7	23,7
140 días	31,0	37,4	62,4	24,4	43,3

recuperación ocurrieron en tiempos diferentes; en Pr, Vi y Cm al final de los 140 días de incubación, en Ur a los 70 y en Cu a los 35 días. Los porcentajes de recuperación más bajos se registraron en Vi y Cm y coincidieron con el menor contenido inicial de P en estos suelos. Ochwoh *et al.* (2005) señalaron que PiML contribuía aproximadamente con el 25% del Pi total extraíble.

El PiLL en el suelo Cu con 0P decreció en forma significativa en el primer día de incubación (Figura 3. PiLL 0P). Posteriormente los cambios fueron menores pero significativos hasta los 140 días. Los cambios en PiLL en los otros cuatro suelos fueron de menor magnitud y algunos significativos. Es de destacar que los niveles de PiLL en Cu fueron aproximadamente más de 4 veces que el encontrado en los otros suelos. Los valores de PiLL más bajos correspondieron a los suelos Vi y Cm.

Cuando se fertilizó el suelo Cu con 200 mg kg<sup>-1</sup> de P el PiLL se mantuvo sin cambios hasta los 35 días de incubación (Figura 3 PiLL 1P), a partir de los cuales se registró una disminución significativa continua hasta los 140 días. El comportamiento de PiLL en el suelo Pr mostró incrementos significativos hasta los 35 días de incubación, en los suelos Vi, Ur y Cm se encontró un incremento significativo inicial en el primer día de incubación, las variaciones posteriores fueron pequeñas.

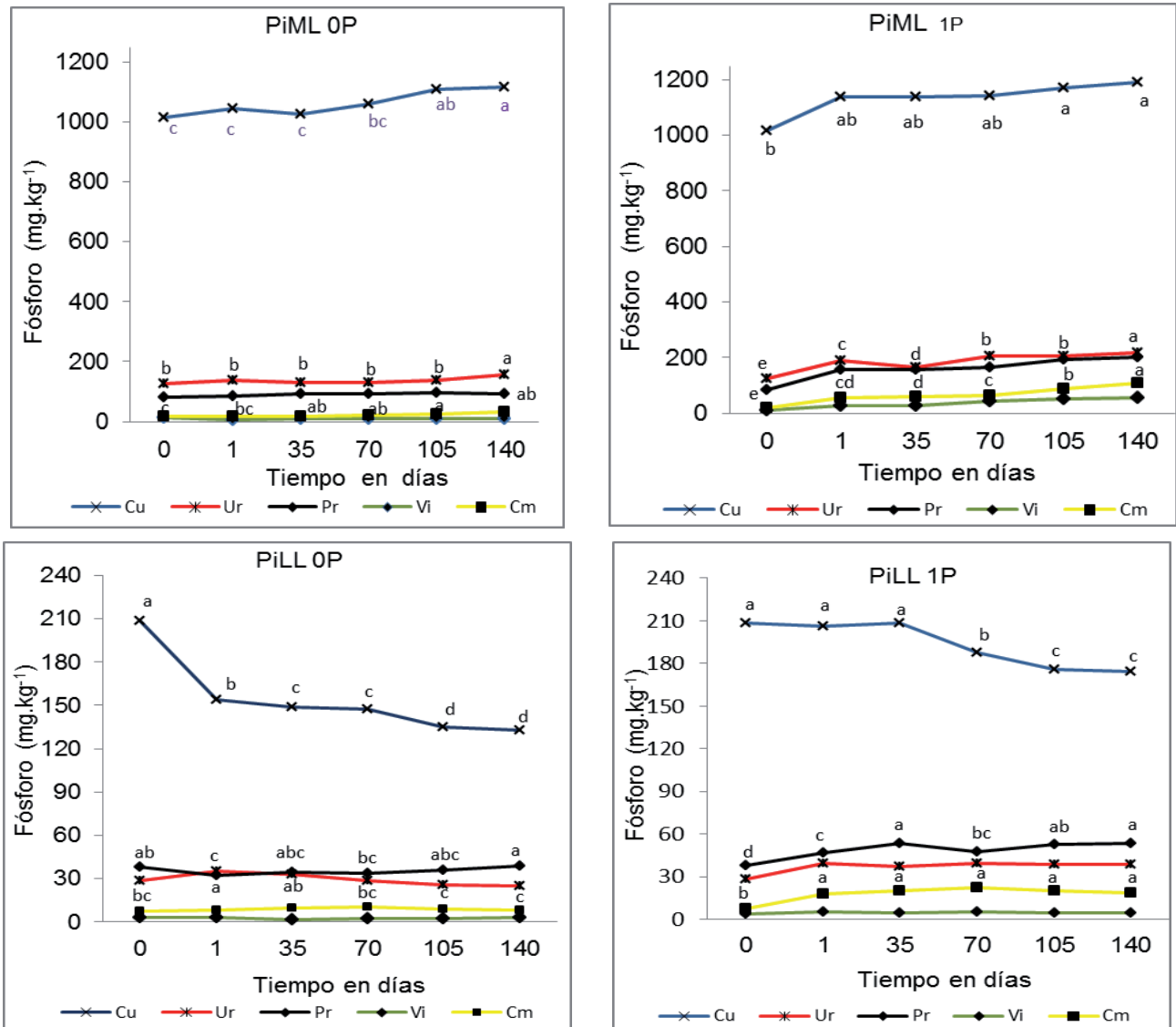
El %P<sub>rec</sub> en forma de PiLL, del aplicado al suelo, en el primer día de incubación fue mayor en

Cu con 20,14% seguido por Pr con 7,42%, Ur con 2,32%, V 1,01% y Cm con 0,56% (Figura 2). La fracción PiLL está ligada a las superficies activas del Ca en el suelo (Hedley *et al.*, 1982) y el %P<sub>rec</sub> de esta fracción, en los cinco suelos, muestra una alta relación con el contenido de Ca de los mismos (Cuadro 2), en la medida que el Ca en el suelo fue mayor el porcentaje de P recuperado como PiLL se incrementó.

Las fracciones de PiML y PiLL son formas que no tienen acción inmediata sobre el P disponible en el suelo (Hedley *et al.*, 1982; Tiessen y Moir, 1993) pero podrían estar disponibles a largo plazo, por consiguiente, es posible considerar que la sumatoria de PiML y PiLL constituirían el Pi actual lábil (PiAL) que vendría a ser una medida de la capacidad actual de restitución del P de la solución del suelo.

El PIAL más bajo después de un día de incubación correspondió al suelo Vi con 11,7% y el valor más alto de 73,8% a Cu (Cuadro 4). A los 140 días de incubación los valores de PiAL variaron entre 24,4% en Vi y 62,4% en Pr. Ochwoh *et al.* (2005) en experimentos de incubación encontraron que entre 30 y 60% del P aplicado al suelo fue transformado a formas menos lábiles después de un día de incubación y de 80 a 90% después de 60 días.

El comportamiento del PiAD y PiAL indica que existen diferencias entre los suelos para acumular el P del fertilizante en forma disponible o lábil en los diferentes períodos de incubación.



**Figura 3.** Fracciones de P inorgánico, PiML y PiLL en los suelos con aplicación de 200 mg de P kg<sup>-1</sup> (1P) y sin aplicación de P (0P) en los suelos Cubiro (Cu), Violeta (Vi), Uribeque (Ur), Portuguesa (Pr) y Camoruco (Cm), durante el período de incubación de 140 días. Letras iguales en la misma línea no son significativamente diferentes, según Tukey  $P \leq 0,05$ .

La fracción de P ocluida es una forma que podría estar disponible para la planta en un período de tiempo muy largo (Cross y Schlesinger, 1995), por consiguiente muy poco o no disponible. El comportamiento del PiO en los suelos con 0P y 1P fue muy parecido (Figura 4). En el suelo Cu se encontró un decrecimiento significativo en el primer día de incubación, para luego estabilizarse hasta el final del experimento. En los otros cuatro suelos no se encontraron diferencias en todo el período de incubación.

La recuperación de PiO fue inferior a 3,0% en el primer día de incubación en todos los suelos, solo una pequeña parte del P aplicado al suelo fue retenida en forma ocluida (Figura 2).

El comportamiento del PRC en el suelo con 0P fue igual al encontrado cuando se incubo el suelo con 1P. En todos los suelos se encontró una declinación inicial del PRC en el primer día de incubación para luego recuperar su nivel original. Estos datos muestran que el P soluble agregado al suelo no fue

retenido como forma recalcitrante en el tiempo que duro el experimento.

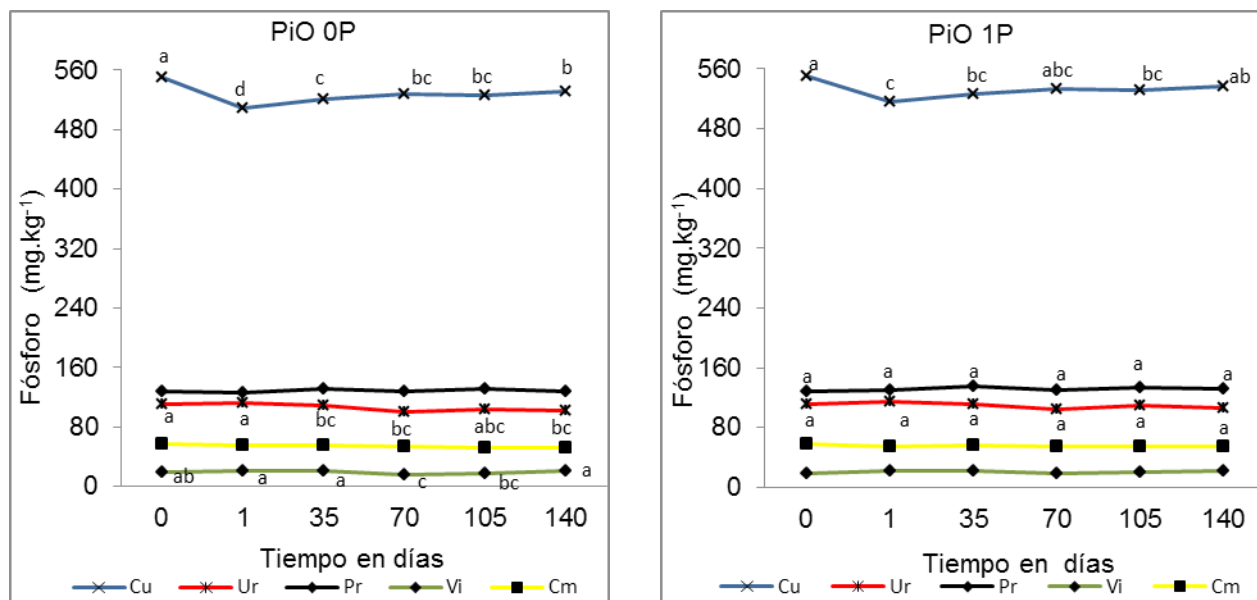
### Fracciones de P orgánico en suelos incubados

El comportamiento de la fracción PoL mostró diferencias entre los suelos cuando estos fueron incubados sin aplicación de fósforo (Figura 5 PoL 0P). El PoL no mostró cambios significativos en el suelo Cu posiblemente debido a la alta concentración de P en el suelo original (Cuadro 2), en cambio, en los suelos Pr y Cm se encontró un decrecimiento significativo después de los 35 y 70 días de incubación respectivamente, que podría ser atribuido a un proceso de mineralización de la fracción orgánica (Cross y Schlesinger, 1995; Linquist *et al.*, 1997). En el suelo Vi se encontró un crecimiento significativo hasta los 35 días en cambio en Ur el incremento fue a partir de los 70 días, este comportamiento parece mostrar la existencia de una mayor actividad de los microorganismos del suelo, dando lugar a la inmovilización del fósforo por ellos, Fernández *et al.* (2006) también encontraron un incremento de la fracción PoL en un suelo ácido incubado por 25 días

sin aplicación de fósforo, estos autores atribuyeron este comportamiento a la inmovilización microbiológica del P en el suelo.

Cuando se aplicó P a los suelos, la fracción PoL en Vi y Pr mostró incrementos significativos en el primer día de incubación, Cm hasta los 35 días y Ur hasta los 140 días (Figura 5 PoL 1P). Este comportamiento pudiera atribuirse a un proceso de inmovilización del P aplicado al suelo por la masa microbiana (Hartono *et al.*, 2000) y que, posiblemente, la provisión de carbono orgánico no fue limitante como fuente de energía para los microorganismos, permitiendo la acumulación de Po al aplicarse P fertilizante al suelo (Tiessen *et al.*, 1992; Zhang *et al.*, 1994). En el suelo Pr no se registraron cambios significativos en el PoL.

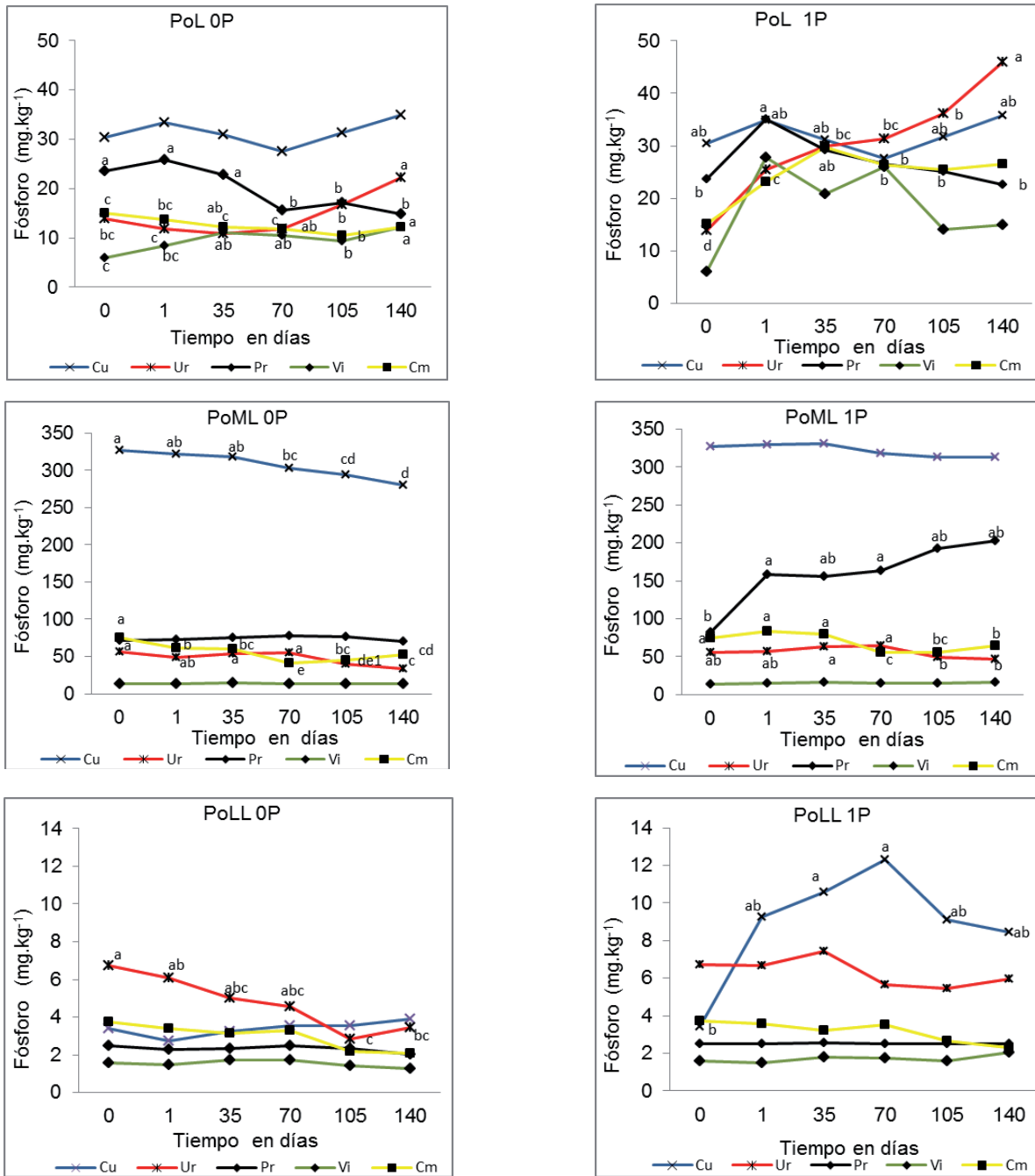
La fracción PoML fue la más abundante en los suelos estudiados, con o sin aplicación de superfosfato triple seguida por PoL y PoLL (Figura 5). La fracción PoML en el suelo Cu fue aproximadamente entre 5 y 8 veces mayor que en los otros suelos con o sin aplicación de P (Figura 5). La magnitud del PoML en los suelos mostró estar relacionada con el contenido de materia orgánica de los suelos (Cuadro 2). Estos



**Figura 4.** Fracciones de P inorgánico ocluido en los suelos Cubiro (Cu), Violeta (Vi), Uribeque (Ur), Portuguesa (Pr) y Camoruco (Cm) con aplicación de 200 mg de P kg<sup>-1</sup> (1P) y sin aplicación de P (0P), durante el período de incubación de 140 días. Letras iguales en la misma línea no son significativamente diferentes, según prueba de Tukey ( $P \leq 0,05$ ).

datos concuerdan con lo encontrado por Araujo *et al.* (2004) en suelos ácidos, donde el PoML fue la fracción más abundante y estuvo relacionada con el contenido de materia de los suelos. Fernández *et al.* (2006) señalaron que existe una asociación entre el PoML con los ácidos orgánicos fúlvico y húmico.

Cuando no se aplicó P a los suelos Cu y Ur, la fracción PoML decreció significativamente a partir de los 70 días de incubación, en cambio en Cm la disminución fue más temprana (Figura 5 PoML 0P), no se encontraron diferencias en los suelos Vi y Pr.



**Figura 5.** Fracciones de P orgánico (PoL, PoML y PoLL) en los suelos Cubiro (Cu), Violetas (Vi), Uribeque (Ur), Portuguesa (Pr) y Camoruco (Cm) con aplicación de 200 mg P kg<sup>-1</sup> (1P) y sin P (0P), incubados por 140 días. Letras iguales en la misma línea no son significativamente diferentes, según prueba de Tukey (P ≤ 0,05).

Con la aplicación de P al suelo la fracción PoML se incrementó en el primer día de incubación en el suelo Pr y decreció al final del período de incubación solo en el suelo Cm (Figura 5 PoML 1P). No se registraron cambios en los otros suelos, este último comportamiento coincide con lo mostrado por Rivaie *et al.* (2008) en un suelo ácido fertilizado con fósforo.

No se encontraron diferencias significativas en el comportamiento de la fracción PoLL, en el tiempo de incubación (Figura 5 PoLL 0P) cuando no se aplicó fertilizante a los suelos, un comportamiento parecido se observó con la aplicación de fertilizante (Figura 5 PoLL 1P) con excepción del suelo Cu donde el PoLL se incrementó significativamente hasta los 70 días de incubación.

## CONCLUSIONES

En los suelos incubados sin aplicación de fósforo la fracción PiR decreció significativamente en los suelos Cubiro, Uribeque y Portuguesa en las primeras 24 horas de incubación, en cambio cuando se aplicó fósforo a los suelos el PiR mostró un incremento significativo en los suelos Uribeque, Violeta, Camoruco y Portuguesa en las 24 horas de incubación.

El comportamiento de las formas de Pi actualmente disponibles y Pi actualmente lábiles, en los cinco suelos, muestra que existen diferencias entre ellos para acumular el Pi disponible o lábil en los diferentes períodos de incubación.

## AGRADECIMIENTO

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

## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS

Adeli, A.; K. R. Sistani; M.F. Bal'a; D. E. Rowe. 2005. Phosphorus dynamics in brolier litter-amended soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 36: 1099-1115.

Araújo, M. S. B.; C. E. R. Schaefer; E. V. S. Sampaio. 2004. Soil phosphorus fractions from toposequences of semi-arid Latosols and Luvisols in northeastern Brazil. *Geoderma.* 119: 309-321.

Barnhisel, R.; P. Bertsch. 1982. Aluminum. *Methods Of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties.* Second edition. Number 9 (part 1). USA.

Buehler, S.; A. Oberson; I. M. Rao; D. K. Friesen; E. Frossard 2002. Sequential phosphorus extraction of a <sup>33</sup>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 <sup>31</sup>PNMR in oxisols under agroforestry and conventional coffee systems in Brazil. *Geoderma* 112: 51-70.

Cross, A. F.; W. H. Schlesinger. 1995. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. *Geoderma.* 64: 197-214.

Doula, M.; A. Ioannou; A. Dinirkou. 1996. Thermodynamics of phosphate adsorption-desorption by alfisols, entisols, vertisols and inceptisols. *Comm. Soil Sci and Plant Anal.* 27:1749-1764.

Du Preez, H. G.; A. S. Claassens. 1999. Changes in inorganic and organic phosphorus in soil under maize (*Zea mays*) cultivation. *S. Afr. J. Plant Soil* 16:207-213.

Fernández, C.; R. Mendoza; S. Vazquez. 2006. Efecto de la incubación sobre fracciones de fósforo extraídas en suelos fertilizados ante distintos sistemas productivos. *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas.* Argentina.

Friesen, D.K.; I. M. Rao; R. J. Thomas; A. Oberson; J. I. Sanz. 1997. Phosphorus acquisition and cycling in crop pasture systems in low fertility tropical soils. *Plant Soil* 196: 289-294.

- Frossard, E.; L.M. Condron; A. Oberson; S. Sinaj; J. C. Fardeau. 2000. Processes governing phosphorus availability in temperate soils. *J. Environ. Qual.* 29: 15-23.
- Hartono, A.; P.L. G. Vieck; A. Moawad; A. Rachim. 2000. Changes in phosphorus fractions on an acidic soil induced by phosphorus fertilizer, organic matter and lime. *J. Soil Sci. and Environ.* 3(2): 1-7.
- Hartono, A.; S. Funakawa; T. Kosaki. 2006. Transformation of added phosphorus to acid upland soils with different soil properties in Indonesia. *Soil Sci. Plant Nutr.* 52: 734-744.
- 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.
- 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.
- Henríquez, C.; R. Killorn. 2005. Soil P forms and P uptake under intensive plant growth in the greenhouse. *Agronomía Costarricense* 29(2): 83-97.
- 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 version 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 phosphorus dynamic during a build up and decline of available phosphorus in an Ultisol. *Soil Sci.* 162: 254-264.
- Ling, S.; R. H. Karamanos. 2013. DTPA Extractable Fe, Mn, Cu and Zn pp.87-90. In: M. Carter (ed). *Soil sampling and methods of analysis.* Can. Soil Sci.. Lewis Publishers.
- McGrath, D.A.; M.L. Duryea; W. P. Cropper. 2001. Soil phosphorus availability and fine root proliferation in Amazonian agroforests 6 years following forest conversion. *Agric. Ecosyst. Environ.* 83: 271-284.
- 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.
- Rivaie, A. A.; P. Loganathan; J. D. Graham; R. W. Tillman; T. W. Payn. 2008. Effect of phosphate rock and triple superphosphate on soil phosphorus fractions and their plant-availability and downward movement in two volcanic ash soils under *Pinus radiata* plantations in New Zealand. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 82: 75-88.
- Schoenau, J. J.; J. W. B. Stewae; J. R. B. Bettany. 1989. Forms and cycling of phosphorus in prairie and boreal forest soils. *Biogeochemistry* 8(3): 223-237.
- Subero, N.; R. Ramírez; O. Sequera; J. C. Parra. 2016. Fraccionamiento de fósforo en suelos cultivados con arroz por largos períodos de tiempo. I. fósforo inorgánico. *Bioagro* 28:13-20.
- Syers, J.K.; A.E. Johnston; D. Curtin. 2008. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. *FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin* 18. Italy.
- Thomas, G. 1982. Exchangeable Cations. In: *Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties*, pp. 159-164. Second edition, No 9. Editor A. L. Page. Agronomy Society of Agronomy. Inc Publisher, Madison Wisconsin, USA.

- Tiessen, H.; I. H. Salcedo; E.V.S.B. Sampaio. 1992. Nutrient and soil organic matter dynamics under shifting cultivation in semiarid north-eastern Brazil. *Agric. Ecosyst. Environ.* 38: 139-151.
- Tiessen, H.; J. Moir. 1993. Characterization of available P by sequential extraction pp.75-86. In: M.R. Carter (ed) *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers.
- Walkley, A.; I. A. Black. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-37.
- Zamuner, E. C.; J. Ph. Culot. 1999. Efecto de la fertilización en la capacidad de sorción de fósforo. *Invest. Agr. Prod. Prot. Veg.* 14(1-2): 107-116.
- Zhang, Y. S.; W. Werner; H.W.Scherer; X. Sun. 1994. Effect of organic manure on organic phosphorus fractions in two paddy soils. *Biol. Fertil. Soils.* 17: 64-68.
- 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.