



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
COMISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
DOCTORADO EN CIENCIAS AGRÍCOLAS



**DISTRIBUCIÓN DE LAS FRACCIONES DE FÓSFORO EN SUELOS ÁCIDOS
VENEZOLANOS Y SU UTILIZACIÓN POR EL CULTIVO DE MAÍZ**

Omaira Sequera

Comité Consejero:

Dr. Ricardo Ramírez
Tutor

Dr. Eduardo Casanova
Asesor

Dr. Juan Comerma
Asesor

Maracay, octubre 2016

**Trabajo presentado como requisito para optar al título de Doctor en Ciencias
Agrícolas**

Comité Consejero:

Dr. Ricardo Ramírez
Tutor

Dr. Eduardo Casanova
Asesor

Dr. Juan Comerma
Asesor

Maracay, octubre 2016

DEDICATORIA

A la memoria de mi padre

AGRADECIMIENTO

A Dios por guiarme y darme la fortaleza para culminar este trabajo

A la UCLA por darme la oportunidad de realizar el doctorado.

A la OPSU por el financiamiento otorgado para alcanzar esta meta.

Al CDCH de la UCLA por el financiamiento otorgado.

A la Universidad Central de Venezuela por la formación académica impartida.

Al Dr. Ricardo Ramírez, mi tutor, por su valiosa amistad, apoyo y su aporte a este trabajo.

Al Dr. Juan Comerma, asesor académico, por sus sugerencias para mejorar el trabajo.

Al Dr. Eduardo Casanova las sugerencias realizadas.

Al Ing. Julio Parra por su amistad, colaboración en los análisis de laboratorio y su ayuda incondicional.

A la Dra. Neudis Subero por su ayuda en los análisis de laboratorio y su amistad.

A María Elena Lugo, Elena Vera, Cleopatra Vergara, Marisol López, Carlos Colmenarez y Gabriela Piñero por la colaboración en el muestreo de los suelos.

A Rómulo Noguera y Miletza Raga, por su colaboración en los análisis de las muestras.

A Sonia Piña y Shirley Fernández por el apoyo y aliento continuo para la culminación de este trabajo.

A Carlos Meza por el apoyo y la amistad.

A mi familia por el amor, apoyo y estímulo para seguir adelante.

A todas las personas de que una u otra forma colaboraron para el desarrollo del trabajo.

RESUMEN

Se evaluó la distribución del fósforo en suelos ácidos del país, el destino del P soluble aplicado al suelo e incubado por 140 días y la utilización del P por el maíz. Se utilizaron doce suelos ácidos la mayoría con más diez años de fertilización fosfórica, provenientes de los estados Portuguesa, Yaracuy, Guárico, Barinas, Cojedes y Lara. Las muestras de suelos se colectaron a una profundidad de 0-20 cm, se secaron al aire y se tamizaron con una malla de 2 mm. En las muestras se determinaron las fracciones de P por Tiessen y Moir (1993). Se realizaron dos experimentos, uno de incubación y otro de invernadero. Se usaron dos tratamientos: 200 mg P.kg⁻¹, en forma de superfosfato triple (1P) y sin fertilizante fosfatado (0P). Se incubaron 5 kg de cada suelo con los tratamientos 1P y 0P. El muestreo se realizó a los 1, 35, 70, 105 y 140 días de incubación y en cada muestra se realizó el fraccionamiento del P para obtener el P inorgánico (Pi) en resina (PiR), Pi y P orgánico (Po) lábil (PiL y PoL), Pi y Po moderadamente lábil (PiML y PoML), Pi y Po ligeramente lábil (PiLL y PoLL), Pi y Po ocluido (PiO y PoO) y P recalcitrante (PRC). Para el segundo experimento, una vez transcurridos los 140 días de incubación, el suelo se secó al aire y se dejó 3,5 kg de suelo por pote, por cada suelo. En cada pote se sembró maíz. Cada tratamiento fue repetido 3 veces. Las plantas se cosecharon 35 días después de la siembra y se determinó la materia seca y el P en el tejido. En la cosecha se tomó una muestra de suelo para hacer el fraccionamiento de P y determinar el P disponible por los métodos Olsen, Bray I y Mehlich III. Los resultados mostraron que la incubación de los suelos sin P produjo una disminución del PiR y PiL y un aumento del PiML. Las fracciones PoL y PoML mostraron más cambios que PoLL y PoO. Al incubar los suelos con P la mayor parte del P se recuperó en PiML, en algunos casos más del 50%. Las fracciones de Po, excepto PoO, aumentaron durante la incubación con P. La distribución del P aplicado al suelo estuvo relacionada con la capacidad de adsorción de P y la cantidad de Fe, Al y Ca de los suelos. El desarrollo del maíz produjo disminución del PiR, PiL, PiML y PiLL; en las fracciones orgánicas la disminución fue menor que en las inorgánicas. El P absorbido por planta proviene del PiL, PiML, PoL, PoML y PoLL. La longitud radical aumentó cuando las fracciones PiL, PiML y PiLL disminuyeron. El P extraído con Olsen resultó el mejor estimador de la disponibilidad del P para el maíz.

Palabras clave: Fraccionamiento de fósforo, fertilización fosfatada, P lábil, P disponible, P absorbido, P orgánico

ABSTRACT

Changes in P soil fractions in Venezuela are not well known. The objectives of this study were to examine the distribution of P in acid soils, the fate of the soluble P applied to the soil and incubated for 140 days and P utilization by maize. Twelve acidic soils were used most with ten years of phosphate fertilization, coming from Yaracuy, Portuguesa, Guárico, Barinas, Cojedes and Lara States. The soil samples were collected at a depth of 0-20 cm, are air dried and sieved with a 2 mm mesh. Soil fractions were determined by Tiessen and Moir (1993) sequential extraction. Two experiments were carried out, one of incubation and other in the greenhouse. For the incubation experiment, two treatments were used: phosphate fertilizer, 200 mg P.kg⁻¹, in the form of triple superphosphate (1P) and without phosphate fertilizer (0P). Sampling was carried out at the 1, 35, 70, 105 and 140 days of incubation. For the second experiment, once past the 140 days of incubation, soil were ground dried and 3.5 kg of soil potted and maize seeded. Plants were harvested 35 days after planting and the dry matter and the P in the tissue were determined. At harvest a sample of soil was taken to determine the fractionation of P and the available P by Olsen and Bray I Mehlich III methods. The results showed that PiR and PiL decreased when soil was incubated with P, but PiML increased, the recovery of PiML was about 50% in some soils. Po fractions, except PoO, increased during incubation with P. Distribution of applied P to the soils was related to P adsorption capacity of soils and to the Fe, Al and Ca content. Maize growth for 35 days produced a decrease of PiR, PiL, PiLL and PiML in the soils. Maize P uptake was close related to PiL and PiML, PoL, PoML and PoLL fractions. Root length decreased as PiL, PiLL and PiML increased. Olsen extractable P was the best estimate of available P for maize.

Key words: P available, P uptake, P fractions, P labile, P organic.

ÍNDICE GENERAL

	Pag.
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
RESUMEN.....	iv
ABSTRACT.....	v
ÍNDICE GENERAL.....	vi
ÍNDICE DE CUADROS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
I. INTRODUCCIÓN.....	1
HIPÓTESIS.....	2
II. OBJETIVOS.....	2
III. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
III.1 Fósforo en el suelo	3
III.2. Reacciones del fósforo en el suelo.....	3
III.3. Formas de fósforo en el suelo.....	4
III.4. Métodos de fraccionamiento de fósforo en el suelo.....	7
III.5. Efecto del manejo del suelo sobre fracciones de fósforo.....	9
III.6. Fracciones de fósforo y su relación con las características del suelo.....	11
III.7. Cambios en las fracciones de fósforo en el suelo por efecto del desarrollo del cultivo.....	13
III.8 Longitud radical y su relación con las fracciones del P en el suelo.....	14
III. Fósforo disponible y su relación con las fracciones de P en el suelo y el desarrollo del cultivo.....	15
IV. MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
IV.1. Análisis físico y químico de los suelos.....	18
IV.2 Fraccionamiento de Fósforo.....	18
IV.3 Capacidad de adsorción de P.....	21
IV.4. Experimento de Incubación.....	22

IV.5 Experimento de invernadero	23
IV.6. Diseño del experimento.....	25
IV.7 Análisis de los resultados.....	25
Análisis estadísticos.....	25
Cálculo del fósforo recuperado.....	25
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	27
V.1. Distribución de las fracciones de fósforo en los suelos originales.....	28
V.2. Comportamiento de las fracciones Pi y Po por efecto de la aplicación de fósforo al suelo y el tiempo de incubación.....	34
V.2.1 Fracciones de P inorgánico.....	34
PiR.....	34
PiL.....	39
PiML.....	43
PiLL.....	47
PiO.....	50
V.2.2 Fracciones de P orgánico.....	53
PoL.....	53
PoML.....	57
PoLL.....	61
PoO.....	66
V.2.3 Fracción Residual (PRC).....	67
P Residual (PRC).....	67
V.3. Fracciones de fósforo y su relación con las propiedades del suelo.....	70
V.4 Cambios en las fracciones de fósforo en el suelo debidos al desarrollo del maíz.....	73
V.4.1 Producción de materia seca.....	73
V.4.2. Cambios en las fracciones de fósforo en el suelo.....	75
V.5. Relación de las fracciones de fósforo en el suelo con la materia seca y fósforo absorbido por el maíz.....	83
V.6. Desarrollo radical con relación a las fracciones de fósforo.....	85
V.7. Relación de la materia seca del maíz, fósforo disponible y fracciones	

de fósforo inorgánico en el suelo.....	86
VI. CONCLUSIONES.....	89
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	91
VIII ANEXO.....	105

ÍNDICE DE CUADROS

		Pag.
1	Secuencia de extracción y diferentes fracciones de fósforo.....	21
2	Historial de uso y manejo de los suelos para el momento del muestreo....	29
3	Características de los suelos.....	30
4	Distribución de las fracciones de fósforo (mg.kg^{-1}) en los doce suelos originales.....	31
5	Porcentajes de cada fracción de P respecto al total de cada suelo.....	32
6	Coeficientes de correlación de Pearson (r) entre las fracciones de P y las propiedades de los suelos.....	70
7	Respuesta de la materia seca del maíz (g.pote^{-1}) a la aplicación de fósforo en doce suelos.....	73
8	Respuesta de la concentración de P (%) en el tejido del maíz a la aplicación de P a doce suelos.....	74
9	Fracciones de P_i (mg.kg^{-1}) en los suelos sin planta y con planta, sin P (0P) y con P (1P) después de 35 días de la siembra de maíz.....	76
10	Fracciones de P_o y P residual (mg.kg^{-1}) en los suelos sin planta y con planta, sin P (0P) y con P (1P) después de 35 días de la siembra de maíz.....	81
11	Coeficientes de correlación entre la materia seca (MS) y fósforo absorbido (P_{ab}) por el maíz con las fracciones de fósforo inorgánico (P_i) y orgánico (P_o) del suelo.....	83
12	Ecuaciones de regresión múltiple para la relación entre la materia seca y el fósforo absorbido y las fracciones de P_i y P_o en los suelos.....	84
13	Coeficientes de correlación para longitud radical (LR) y las fracciones de P inorgánico.....	85
14	Coeficientes de correlación simple entre la materia seca, el P absorbido por el maíz y el P disponible determinado por tres métodos.....	86
15	Ecuaciones de regresión múltiple para las variables dependientes P disponible por Olsen, Bray I y Mehlich III en función de las fracciones de fósforo inorgánico.....	87

ÍNDICE DE FIGURAS

		Pag.
1	Esquema de tratamientos de incubación (a) e invernadero (b), para cada suelo, sin aplicación de P (0P) y con P (1P).....	23
2	Cambios en PiR en los tres grupos de suelos, en diferentes tiempos de incubación, sin aplicación de P (0P) y con aplicación de P (1P).....	36
3	Porcentaje de P recuperado, en los tres grupos de suelos, por la fracción PiR, en los diferentes tiempos de incubación.....	38
4	Cambios en el PiL, de tres grupos de suelos, en diferentes tiempos de incubación, sin aplicación de P (0P) y con aplicación de P (1P).....	40
5	Porcentaje de P recuperado, en los tres grupos de suelos, por la fracción Pi NaHCO ₃ , en los diferentes tiempos de incubación.....	42
6	Cambios en el PiML, de tres grupos de suelos, en diferentes tiempos de incubación, sin aplicación de P (0P) y con aplicación de P (1P).....	45
7	Porcentaje de P recuperado, en los tres grupos de suelos, por la fracción PiML, en los diferentes tiempos de incubación.....	46
8	Cambios en el PiLL, de tres grupos de suelos, en diferentes tiempos de incubación.....	48
9	Porcentaje de P recuperado, en los tres grupos de suelos, por la fracción PiLL, en los diferentes tiempos de incubación.....	49
10	Cambios en el PiO, de tres grupos de suelos, en diferentes tiempos de incubación.....	51
11	Porcentaje de P recuperado, en los tres grupos de suelos, por la fracción PiO, en los diferentes tiempos de incubación.....	52
12	Cambios en el PoL, de tres grupos de suelos, en diferentes tiempos de incubación, sin aplicación de P (0P) y con aplicación de P (1P).....	55
13	Porcentaje de P recuperado, en los tres grupos de suelos, por la fracción PoL, en los diferentes tiempos de incubación.....	56

14	Cambios en el PoML, de tres grupos de suelos, en diferentes tiempos de incubación, sin aplicación de P (0P) y con aplicación de P (1P).....	59
15	Porcentaje de P recuperado, en los tres grupos de suelos, por la fracción PoML, en los diferentes tiempos de incubación.....	60
16	Cambios en el PoLL, de tres grupos de suelos, en diferentes tiempos de incubación, sin aplicación de P (0P) y con aplicación de P (1P).....	62
17	Porcentaje de P recuperado, en los tres grupos de suelos, por la fracción PoLL, en los diferentes tiempos de incubación.....	63
18	Cambios en el PoO, de tres grupos de suelos, en diferentes tiempos de incubación, sin aplicación de P (0P) y con aplicación de P (1P).....	65
19	Porcentaje de P recuperado, en los tres grupos de suelos, por la fracción PoO, en los diferentes tiempos de incubación.....	66
20	Cambios en el PRC, de los tres grupos de suelos, en diferentes tiempos de incubación, sin aplicación de P (0P) y con aplicación de P (1P).....	68
21	Porcentaje de P recuperado, en los tres grupos de suelos, por la fracción PRC, en los diferentes tiempos de incubación.....	69
22	Relación de la materia seca del maíz con la concentración de fósforo en el tejido.....	75

I. INTRODUCCIÓN

El fósforo (P) es un nutriente esencial para las plantas y frecuentemente es más limitante en los suelos ácidos tropicales (Buehler *et al.*, 2002). Para realizar un manejo sostenible de los agroecosistemas tropicales es necesario conocer la dinámica del P en el sistema suelo planta, especialmente el destino del P del fertilizante a corto y largo plazo (Friesen *et al.*, 1997).

La dinámica del P en el suelo determina las diferentes fracciones en que se encuentra y está en función de las características mineralógicas, químicas, físicas y biológicas del suelo. Las transformaciones de las formas orgánicas e inorgánicas del P están estrechamente relacionadas, dado que parte del P inorgánico está disponible para los microorganismos y las plantas, por su parte el P orgánico al mineralizarse sería una fuente de reposición de P inorgánico a la solución del suelo (Beck y Sanchez, 1994). Las formas de P en el suelo tienen diferente solubilidad, y su distribución indicaría la disponibilidad de P para la planta (Adeli *et al.*, 2005). En suelos ácidos, la mayor parte del P forma compuestos insolubles con Fe y Al, mientras que en condiciones alcalinas predominan los fosfatos de Ca (Cross y Schlesinger, 1995).

El conocimiento de las formas químicas de los fosfatos es importante para el entendimiento de la química del P del suelo y de la fertilidad del mismo (Adams, 1995), sin embargo, se han realizado pocos estudios sobre la distribución de fósforo en suelos ácidos y de la utilización de sus diferentes formas por la planta. Este trabajo pretende aportar información sobre la distribución de las fracciones de fósforo en suelos ácidos del país, el destino del fósforo soluble del fertilizante y su utilización por el maíz.

HIPÓTESIS

Las fracciones de fósforo en el suelo varían con el tiempo cuando este se incubaba con fertilizante fosfatado soluble por largos periodos, las fracciones resultantes estarían disponibles para la absorción y utilización por las plantas.

II. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la distribución de las fracciones de fósforo en doce suelos ácidos del país y su utilización por el maíz.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Estudiar la ocurrencia de las fracciones de fósforo en los suelos ácidos en diferentes periodos de incubación.
2. Evaluar los posibles cambios del fósforo soluble del fertilizante, en suelos ácidos, hacia fracciones menos disponibles.
3. Determinar el efecto de las diferentes características de los suelos sobre las fracciones de P.
4. Determinar los cambios en las diferentes fracciones de fósforo en el suelo por el efecto del desarrollo del maíz en un periodo de 35 días.
5. Estimar la procedencia del fósforo absorbido por el maíz a los 35 días de cultivo.
6. Relacionar el desarrollo radical del maíz con las diferentes fracciones de fósforo del suelo.
7. Relacionar el fósforo disponible extraído por el método de Bray I, Olsen y Mehlich III con el fósforo de la planta, la materia seca del maíz y las fracciones de fósforo en el suelo.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

III.1. Fósforo en el suelo

El fósforo (P) es uno de los nutrientes esenciales más limitantes en los sistemas de producción de regiones tropicales (Szogi *et al.*, 2012), es poco móvil y su disponibilidad depende de reacciones de carácter químico y biológico (Ben-Gal y Dudley, 2003).

En suelos tropicales, el contenido de P total en la capa arable puede oscilar entre 18 y 3.300 mg.kg⁻¹ (Fassbender y Bornemisza, 1987). Solo una pequeña fracción del P total del suelo se encuentra en forma disponible o asimilable para las planta, en algunos suelos apenas el 1% (Da Silva, 2009; Afif *et al.*, 2013).

El P del fertilizante aplicado al suelo es convertido rápidamente en formas altamente solubles que son absorbidas por las raíces, adsorbidas por las partículas minerales y orgánicas del suelo o forma compuestos con el aluminio, hierro y calcio, estos últimos son menos disponibles para las plantas (Vu *et al.*, 2008). Sólo 15-30% del P aplicado en la fertilización es absorbido por el cultivo, por lo tanto, para entender la dinámica del P en el sistema suelo planta es importante determinar la distribución del P en el suelo luego de aplicado el fertilizante (Syers *et al.*, 2008).

III. 2. Reacciones del fósforo en el suelo

Las reacciones que controlan el ciclo del P en el suelo incluyen la adsorción-desorción, solubilización-precipitación y la mineralización-inmovilización. Las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, el tipo de fertilizante aplicado y el cultivo determinan la dirección y velocidad de estas reacciones (Blake *et al.*, 2000; Bunemann *et al.*, 2004). En suelos tropicales, los flujos del P entre las diferentes formas químicas están controlados principalmente por reacciones de adsorción-desorción e inmovilización-mineralización (Buehler *et al.*, 2002).

La adsorción es la retención de una parte del P soluble en solución, en la fase sólida del suelo. El P adsorbido puede regresar a la solución del suelo (desorción) donde está disponible para la planta (Afif *et al.*, 2013). La capacidad de un suelo de adsorber P depende del contenido de arcilla, cantidad de óxidos de Fe y Al, pH, materia orgánica, cantidad de P aplicada al suelo, tiempo de contacto suelo-fertilizante y actividades microbiológicas (Onweremadu y Ofoh, 2007; Amel y Sirelkhatim, 2012).

Una forma de estudiar la adsorción del P en el suelo es mediante las isotermas de adsorción que describen cuantitativamente la adsorción de solutos a la superficie sólida, a temperatura constante, mostrando la cantidad de soluto adsorbido de una concentración en equilibrio (Garófalo *et al.*, 2012). Las ecuaciones más utilizadas para describir la adsorción de P han sido propuestas por Langmuir, Freundlich y Temkin, sin embargo, la aplicabilidad de una ecuación u otra depende de las características del suelo. En nuestro país la mayoría de los investigadores han utilizado la isoterma de Langmuir para caracterizar la adsorción de P (Hernández-Valencia y Bautis, 2005; Pérez *et al.*, 2009).

Por otra parte, la transformación del P orgánico (Po) a P inorgánico (Pi) es realizada por los microorganismos del suelo, proceso conocido como mineralización, pero también pueden incorporar el P a sus tejidos inmovilizándolo temporalmente. La mineralización del P orgánico se puede determinar considerando la disminución del nivel de P orgánico en los suelos como resultado de un cultivo intensivo o en resultados de experimentos de laboratorio de corta duración, en los que se relaciona la disminución en el contenido de P orgánico de los suelos con el incremento del fosfato inorgánico (Tisdale y Nelson, 1991).

III.3. Formas de fósforo en el suelo

La información sobre las diferentes formas del P es fundamental para entender la dinámica de este elemento y sus interacciones en el suelo. La fuente mineral de P más importante en el suelo es la apatita, que se encuentra en casi todas las rocas que forman los suelos (Rosling *et al.*, 2007). Este mineral es poco soluble en suelos neutros

y alcalinos y se hidroliza a medida que progresa la alteración y el desarrollo del suelo, una parte constituye el P disponible en la solución del suelo. El P en solución puede ser absorbido por las raíces, retenido por las superficies minerales, precipitando con algunos cationes o ser incorporado a la biomasa microbiana y a la materia orgánica del suelo (Fassbender y Bornemisza, 1987).

En el suelo, el P se encuentra combinado en fosfatos de diferente naturaleza, procedentes del material de origen o de los fertilizantes aplicados. Debido a que este elemento es químicamente muy reactivo se han identificado más de 170 minerales de fosfato, incluyendo formas orgánicas (Holford, 1997). Los procesos biológicos y geoquímicos determinan la cantidad y las diferentes formas de P del suelo (Tiessen *et al.*, 1984; Smeck, 1985).

El conocimiento sobre cada una de las formas de P es importante desde el punto de vista de la nutrición de los cultivos, ya que no todas son disponibles para las plantas y las formas no disponibles pueden pasar a formas disponibles a través de procesos propios del suelo. En suelos poco desarrollados, como inceptisoles, la alteración de los minerales primarios da origen a una fracción de P lábil de disponibilidad inmediata para las plantas. En suelos con moderado régimen de alteración, gran parte del P está presente en formas orgánicas o adsorbidas a minerales secundarios de arcilla. Mientras que, en suelos muy degradados como oxisoles, el P se encuentra principalmente en formas no lábiles, ocluidas o formando parte de compuestos orgánicos estables (Tisdale *et al.*, 1985).

La clasificación de las formas de P, divide el P total del suelo en P inorgánico (Pi) y P orgánico (Po). Entre los fosfatos inorgánicos se distinguen los fosfatos de calcio, de aluminio y de hierro, fosfatos adsorbidos y los presentes en la solución del suelo (Fassbender y Bornemisza, 1987). El contenido del P inorgánico en los suelos, por lo general, es mayor que el P orgánico. La excepción es el contenido de P en suelos predominantemente orgánicos (Tisdale y Nelson, 1991).

El P orgánico proviene de la degradación de residuos biológicos que son incorporados al suelo y está formado por los fosfolípidos, azúcares, ácidos nucleicos y el P asociado a compuestos estables como ácidos húmicos y fúlvicos (Adams, 1995). La fracción orgánica puede representar desde un 15 al 80% del contenido total de P del suelo. El Po puede ser mineralizado por los microorganismos y enzimas del suelo para producir Pi disponible o ser adsorbido u ocluido dentro de la matriz mineral del suelo, y por lo tanto, protegido del ataque microbiano (Hernández-Valencia, 2008). En suelos con bajos niveles de P, la mineralización de la fracción orgánica es importante para mantener un nivel adecuado de P disponible para las plantas (Boschetti *et al.*, 2003).

Las formas orgánicas e inorgánicas del P en el suelo dependiendo de su solubilidad o disponibilidad para las plantas, se pueden agrupar en:

P lábil: representa la fracción disponible a corto plazo para los microorganismos y las plantas, porque se desorbe rápidamente de la superficie de las partículas del suelo o de las superficies cristalinas de compuestos de P (Wagar *et al.*, 1986). Incluye los aniones de fosfato monoácido (HPO_4^{-2}) y diácido (H_2PO_4^-) presentes en la solución del suelo (Fuentes, 1999). También incluye el Po, adsorbido sobre los coloides del suelo, que puede ser fácilmente mineralizado para contribuir a la fracción disponible (Tiessen *et al.*, 1984).

P moderadamente lábil: es una forma estable de P, de baja solubilidad, disponible a mediano plazo (Schoenau *et al.*, 1989). Incluye asociaciones de Pi y Po con el exterior de los fosfatos amorfos de Fe y Al (Tiessen *et al.*, 1984).

P ligeramente lábil: Forma de P más estable que el ligado al Fe y Al, representado por el P precipitado con el Ca (Hedley *et al.*, 1982), extraíble con ácidos como el HCl.

P ocluido: Es el P encapsulado físicamente por minerales, en esta forma está protegido (Smeck, 1985), y por tanto su disponibilidad sería a muy largo plazo; el P tiende a ocluirse en óxidos de Fe y Al. El Pi ocluido también incluye el Pi que se

encuentra en las superficies internas de los agregados del suelo, el encapsulado en el interior de los sesquióxidos (Hedley *et al.*, 1982; Wagar *et al.*, 1986), el Pi menos lábil asociado con el interior de los fosfatos amorfos de Fe y Al y gran parte del Pi ligado al Ca (Tiessen *et al.*, 1984) mientras que el Po ocluido está asociado a los compuestos húmicos.

P residual o recalcitrante: es una parte del P que no es fácilmente identificable con ninguna de las fracciones establecidas. Es el P encapsulado por los minerales silicatados, primarios o secundarios. En esta categoría se incluyen el Po de mayor estabilidad y asociaciones P-humus de baja biodisponibilidad. Esta fracción residual es abundante en suelos oxisoles y ultisoles tropicales (Udo y Ogunwale, 1977). Sin embargo, no está clara la naturaleza química exacta de esa fracción residual o inerte (López-Hernández *et al.*, 1989).

III.4. Métodos de fraccionamiento de fósforo en el suelo

Los métodos de fraccionamiento de P permiten determinar y cuantificar las diferentes formas de P y conocer la disponibilidad a corto, mediano y largo plazo para las plantas (Hernández-Valencia y Bautis, 2005). Dichos métodos han sido descritos por Chang y Jackson (1957), Jackson (1958), Hedley *et al.* (1982), Perrot *et al.* (1989) y Tiesen y Moir (1993). Cada método usa una secuencia de extractantes químicos que extraen desde las formas más lábiles hasta las más estables (recalcitrantes) (Blake *et al.*, 2003).

El fraccionamiento secuencial de P desarrollado por Chang y Jackson (1957) y modificado por Jackson (1958); Petersen y Corey (1966) y Williams *et al.* (1967), ha sido utilizado para caracterizar el Pi y para explicar los procesos de transformación del P durante la edafogénesis (Westin y Brito, 1969). Este método no diferencia las fracciones del Po.

Hedley *et al.* (1982) propusieron un fraccionamiento secuencial para determinar no sólo el P_i , sino también las formas lábiles y más estables del P_o . El procedimiento permite realizar una buena caracterización del P del suelo y puede usarse para estudiar los cambios de este elemento en experimentos de incubación de corta duración. El método consiste en separar y caracterizar el P liberado con una resina de intercambio aniónico, para luego separar las fracciones de P menos solubles y permite determinar pequeños cambios en el P del suelo. Los extractantes usados remueven primero las formas de P inorgánicas y orgánicas lábiles y luego extraen las formas más estables. El P inorgánico, biológicamente disponible, corresponde al removido primero con la resina de intercambio aniónico. Las formas lábiles de P_i y P_o adsorbidas sobre las superficie del suelo, son extraídas con NaHCO_3 0,5 M, el P_i y P_o ligado al aluminio y al hierro son extraídas con NaOH 0,1 M, un extractante ácido (HCl 1M) remueve principalmente el P en los minerales tipo apatita y las formas de P_o químicamente estables y finalmente las formas P relativamente insolubles son disueltas por oxidación y digestión con H_2SO_4 y H_2O_2 .

La principal ventaja del esquema de Hedley *et al.* (1982) sobre otros métodos es que con la misma muestra de suelo, tratada secuencialmente con diversos reactivos, se establece la proporción existente entre las diferentes fracciones de P en el suelo, separando las formas potencialmente disponibles de otras que no lo son.

Tiessen y Moir (1993) señalaron como limitante del método de Hedley *et al.* (1982) que entre 20 y 60% del P del suelo no es extraído y este residuo contiene P_o , que podría ser mineralizado en corto tiempo. Estos autores propusieron una modificación, reagrupando las fracciones de P e incluyeron una extracción con HCl concentrado para conocer mejor la fracción recalcitrante. Las fracciones de P se definieron de la siguiente manera, P_i -resina, P_i y P_o - NaHCO_3 , P_i y P_o - NaOH , P_o y P_i HCl 1M, P_i y P_o HCl concentrado y P H_2SO_4 .

Las fracciones extraídas con resina y NaHCO_3 son consideradas lábiles, altamente disponibles para las plantas, el P NaOH moderadamente lábil, P HCl 1M

ligeramente lábil, el P HCl concentrado es no lábil u ocluido y el P H₂SO₄ es el P residual o recalitrante (Hedley *et al.*, 1982, Tiessen y Moir, 1993).

III.5. Efecto del manejo del suelo sobre las fracciones de fósforo

Los cambios en el uso del suelo pueden producir modificaciones en el ciclo de los nutrientes y, por lo tanto, en la disponibilidad del P para la planta (Lilienfein *et al.*, 2002).

El fraccionamiento químico del P ha sido utilizado para el estudio del grado de evolución del P en el perfil del suelo (Chang y Jackson, 1958) y para el estudio del destino de los fertilizantes fosfatados aplicados al suelo (Chang y Chu, 1961).

La distribución del P en ecosistemas naturales y agroecosistemas depende del grado de evolución del perfil. Esta relación entre la taxonomía y la distribución del P en el suelo ha sido presentada por Fassbender *et al.* (1968) en América Central, Westin y Brito (1969) en Venezuela y Tiessen *et al.* (1984) en los Estados Unidos.

Tiessen *et al.* (1984) determinaron las fracciones de P en suelos del Brasil, y encontraron que el P lábil, en Molisoles, estaba asociado con formas inorgánicas extraíbles con bicarbonato y con hidróxido de sodio. En cambio en los Ultisoles estaba principalmente como formas orgánicas, por lo tanto, las transformaciones de P del suelo dependen del tipo y características del suelo, condiciones climáticas y de las prácticas de manejo.

El grado de intemperización del suelo influye en el balance entre la pérdida y retención de P (Gardner, 1990). Una parte importante de los suelos de regiones tropicales son altamente meteorizados y su complejo de intercambio está dominado por los sesquióxidos (Giuffré *et al.*, 2000). Estos suelos adsorben y fijan el P, lo que se traduce en una deficiencia del elemento (Sollins *et al.*, 1988), que limitaría el crecimiento de las plantas.

La capacidad de adsorción de P de la mayoría de los suelos altamente meteorizados puede ser atribuida a la acción de varios óxidos, hidróxidos y oxihidróxidos de Fe y Al (Van Der Zee y Van Riemsdijk, 1986; Parfitt, 1989, Vazquez *et al.*, 2004), algunos de estos componentes son activos no cristalinos de Fe y Al (Guo y Yost, 1999).

Westin y Brito (1969) relacionaron las formas de P presentes en 23 suelos venezolanos con la intensidad de meteorización y encontraron que el P total, P activo, (P-Al, P-Fe y P-Ca) y P orgánico varían con el pH. El porcentaje de P-Fe fue más bajo en suelos ligeramente meteorizados (generalmente de pH alto) y más alto en suelos fuertemente meteorizados (usualmente de pH bajo) mientras que el P-Ca mostró un patrón de comportamiento opuesto. En cuanto al P-Al, encontraron pequeñas cantidades en suelos fuertemente meteorizados, bajo condiciones de buen drenaje, pero puede acumularse en suelos pobremente drenados y fuertemente meteorizados.

En investigaciones sobre la dinámica de las fracciones de P en el suelo, sin aplicación de fertilizantes, se ha encontrado que el P_o extraído con NaOH, es parte del P asimilable en suelos tropicales. Beck y Sánchez (1994) demostraron que el P_i extraído con NaOH proviene de los fosfatos agregados al suelo y que el P_o fue la mayor fuente de P lábil en suelos no fertilizados, bajo cultivo.

En cuanto al efecto de los fertilizantes fosfatados sobre las distintas fracciones de P, Zamuner y Culot (1999) encontraron que la aplicación de altas dosis de P produjo un aumento de la fracción inorgánica más lábil, un año después de la fertilización. Los resultados obtenidos por Henríquez y Killorn (2005) en experimentos de incubación, señalaron que cambios entre las formas disponibles y no disponibles de P en el suelo, ocurrieron 15 días después de la aplicación del fertilizante.

Una forma de estimar la cantidad de P que se incorpora a una determinada fracción, después de aplicar una dosis de fertilizante fosfatado, es mediante el cálculo del P recuperado. Se cuantifica la fracción de P en el suelo fertilizado y en el testigo sin fertilizar y la diferencia es asumida como el P recuperado. El cálculo del P recuperado

ha sido utilizado por Ayodele y Agboola (1981) para establecer el factor fertilizante fosfatado que sirve de base para las recomendaciones de fertilizante y por Miller *et al.* (2010) para comparar el aporte al P disponible en el suelo por los fertilizantes orgánicos y minerales.

El P recuperado también ha sido utilizado para estimar la cantidad de P aplicado como fertilizante que pasa a formar parte de las diferentes fracciones del P en el suelo, desde las más lábiles o disponibles hasta las no lábiles, por medio del fraccionamiento (Ochwoh *et al.*, 2005a).

Los experimentos de corta duración han sido utilizados para estudiar las transformaciones del P en el suelo, al respecto, Ochwoh *et al.* (2005a), evaluaron los cambios químicos del P nativo y del aplicado al suelo en experimentos de incubación, encontrando que aproximadamente 30-60% del P aplicado fue transformado a formas menos lábiles después de 1 día de incubación y 80-90% después de 60 días de incubación. Por lo que, recomiendan la colocación del fertilizante en banda para aumentar su eficiencia ya que de esta forma una mayor cantidad de P puede permanecer en forma lábil. Hartono *et al.* (2006) evaluaron los cambios del P aplicado a suelos ácidos e incubados por 90 días y concluyeron que el P fue transformado a Pi resina, Pi NaHCO₃ y Pi NaOH.

Por otra parte, Selles *et al.* (1999) señalaron que la fracción residual (P H₂SO₄) incluye las formas de P más recalcitrantes, con menos probabilidad de cambiar en el corto plazo o ser afectada por el manejo del suelo o fertilización.

III.6. Fracciones de fósforo y su relación con las características del suelo

Las características físicas, químicas y mineralógicas del suelo y la actividad biológica determinan la distribución del P en el suelo (Magid, 1993; Cross y Schlesinger, 1995). El tamaño de las fracciones de P es controlado por la cantidad y tipo de arcilla, materia orgánica, óxidos de Fe y Al y carbonatos presentes en el suelo (Samadi y Gilkes 1998; Cassagne *et al.*, 2000).

Los cambios en las formas de P en el suelo están relacionados con la textura del mismo (Hedley *et al.*, 1982). O'Halloran *et al.* (1985) estudiaron la influencia de la textura y el manejo del suelo sobre las fracciones de P y encontraron que la textura representaba hasta un 90% de la variabilidad del P total. El contenido de limo y arcilla fue relacionado positivamente con el P_i resina, P_i y P_o extraíbles con NaHCO_3 y P_i y P_o extraíbles con NaOH , pero estos componentes del suelo fueron relacionados negativamente con el P extraído con HCl (O'Halloran *et al.*, 1987). Zheng *et al.* (2003) encontraron que el 78% de la variación del P lábil y el 90% de la variación del P total estaban relacionados con el contenido de arcilla.

Huffman *et al.* (1996) encontraron que la textura del suelo tuvo mayor efecto en las transformaciones del P lábil que las aplicaciones de nutrientes y la colocación de residuos cosecha. Tiessen y Stewart (1983) y Ruboek *et al.* (1999) observaron un aumento en el contenido del P_o con la disminución del tamaño de las partículas del suelo. Estudios realizados en suelos de climas templados y tropicales han indicado que el aumento del P disponible en el suelo, por unidad de P aplicado, fue menor en suelos de textura fina que en suelos de textura gruesa (Kovar y Barber, 1988; Johnston *et al.*, 1991; Cox, 1994).

El pH también influye en la distribución de las fracciones de P del suelo, el P forma compuestos insolubles con el Ca en suelos alcalinos y con Fe y Al en suelos ácidos. Por lo tanto, los suelos con pH bajos donde predominan los óxidos de Fe y Al, tienen altas cantidades de P en formas orgánicas e inorgánicas extraíbles NaOH y, bajos valores de P extraído con HCl (Guo *et al.*, 2000). Shaheen *et al.* (2007) encontraron que el P_i NaHCO_3 , fracción disponible para la planta, correlacionó negativamente con el pH del suelo, estos autores explicaron que en suelos neutros y alcalinos, predominan los fosfatos de calcio y disminuyen las fracciones disponibles, como la extraída con NaHCO_3 .

El efecto de la materia orgánica sobre la disponibilidad del P ha sido demostrado por la relación entre el P inmediatamente disponible para las plantas (extraído con resina o membrana de intercambio aniónica) con el contenido de carbono orgánico del

suelo. Los compuestos orgánicos en el suelo incrementan el P disponible porque recubren los óxidos de Fe y Al, formando una cubierta protectora que reduce la adsorción del P o por el reemplazo de los aniones H_2PO_4^- en los sitios de adsorción por aniones orgánicos tales como citrato, oxalato, tartrato o malato (Havlin *et al.*, 1999, Staunton y Leprince, 1996). Sin embargo, la materia orgánica no sólo afecta el intercambio aniónico, sino que también interviene en la dinámica del P por la formación de complejos órgano-fosfatados que son fácilmente atacables por los microorganismos del suelo y al mineralizarse contribuyen al fósforo disponible.

III.7. Cambios en las fracciones de fósforo en el suelo por efecto del desarrollo del cultivo.

Los experimentos de corta duración han sido utilizados para estimar los cambios de las fracciones de P en respuesta a la absorción de P por la planta (Samadi 2006; Li *et al.*, 2008; Rose *et al.*, 2010). El fraccionamiento de P del suelo es útil para medir pequeños cambios en las fracciones de P del suelo en cortos periodos de tiempo (Hedley *et al.*, 1982; Ochwoh *et al.*, 2005a).

La cantidad de P presente en la solución del suelo es una pequeña fracción de lo que necesita la planta (Henríquez y Killorn, 2005). La absorción de P por la planta produce una reducción del P de la solución del suelo que induce a la reposición del elemento a partir de las formas de P lábiles y moderadamente lábiles. Una vez agotadas estas últimas, las formas menos solubles tales como minerales secundarios de P serán las que determinen la concentración de P en la solución del suelo (Galantini *et al.*, 2005). El P que repone la fracción lábil proviene tanto de compuestos inorgánicos como orgánicos presentes en el suelo o de otras fuentes como la aplicación de fertilizantes y residuos orgánicos (Gatiboni *et al.*, 2007).

La estrecha relación entre las fracciones P_i resina, P_i bicarbonato y P_o bicarbonato y su sensibilidad a la absorción de P por las plantas sugiere que estas fracciones son sensibles a la disminución en el contenido de P en la solución de suelo y que conforman el P lábil del suelo (Guo y Yost, 1998; Henríquez y Killorn, 2005).

Guo y Yost (1998) realizaron un experimento de invernadero con maíz y soya y encontraron una disminución de Pi resina y Pi bicarbonato y lo atribuyeron a la absorción de P por las plantas. La reducción de las dos fracciones lábiles coincidió con una disminución del Pi NaOH. Los investigadores concluyeron que parte del Pi NaOH fue transformado a formas lábiles, Pi resina y Pi bicarbonato. Por el contrario, Gatiboni *et al.* (2007) observaron un aumento en Pi resina y Pi bicarbonato después de varios cultivos de maíz, pasto y soya y a su vez ocurrió una disminución del Po extraído con bicarbonato. Para estos investigadores la absorción del Pi lábil desencadenó un proceso de mineralización del Po, para reponer el Pi absorbido por las plantas. Al respecto Gikonyo *et al.* (2008) mencionaron que el Po NaHCO₃ puede mineralizarse rápidamente para reemplazar parte de Pi lábil absorbido por las plantas.

Las relaciones entre la absorción de P por planta y las diferentes formas de P en los suelos varían de acuerdo a las características del suelo (Zhang y MacKenzie 1997). En suelos calcáreos, la absorción de P por planta ha sido relacionada con el P ligado al Ca (Kamprath y Watson, 1980), P extraíble con resina (Yang y Jaccobsen, 1990) y P extraído con bicarbonato (Solís y Torrent, 1989). En suelos ácidos, la absorción de P ha sido relacionada con las fracciones lábiles (Henríquez y Killorn, 2005) y el P ligado al Fe y Al (Patiram *et al.*, 1990, Bahl y Singh, 1997).

Las especies de plantas difieren en su capacidad para acceder a las diferentes fracciones de P del suelo, Li *et al.* (2008) reportaron que la absorción de P por el trigo, durante cuatro semanas, produjo una disminución de las fracciones de P extraídas con resina, NaHCO₃ y NaOH. Mientras que el maíz, además de utilizar las fracciones mencionadas, es capaz de movilizar el P extraído con HCl (Bahl y Singh, 1997; Bertrand *et al.*, 1999).

III.8. Longitud radical y su relación con las fracciones del P en el suelo

La morfología radical de la planta es importante para la adquisición de nutrientes que se movilizan en el suelo a través de mecanismos de difusión, como es el caso del

P que solo se desplaza pocos milímetros, debido a su alta interacción con la matriz del suelo (Barber, 1962, Fransson *et al.*, 2003). La absorción de este nutriente depende, en gran medida, del grado en que las raíces exploren el mayor volumen de suelo posible (Hill *et al.*, 2006). Las plantas difieren en sus habilidades de adquirir nutrientes relativamente inmóviles como el P (Grant y Matthews, 1996). Generalmente la deficiencia de P en el suelo incrementa la longitud radical (LR) y disminuye el diámetro de las raíces (Lambers *et al.*, 2006), para incrementar la absorción del nutriente.

Los resultados obtenidos por Alves *et al.* (2001) indicaron que el incremento de la LR bajo deficiencia de P es, posiblemente, uno de los mecanismos de eficiencia de utilización de P del maíz. Considerando que las diferentes fracciones de P en el suelo presentan diferente solubilidad o disponibilidad para la planta (Hedley *et al.*, 1982), el predominio de fracciones menos lábiles en el suelo podría generar un aumento de la longitud de las raíces de las plantas.

III.9. P disponible y su relación con las fracciones de P en el suelo y el desarrollo del cultivo

El estudio de las relaciones entre las diferentes fracciones de P en el suelo, el P disponible y la absorción de P por la planta es útil para identificar las fracciones de P disponibles para la planta y para seleccionar el método de análisis de suelo que refleje mejor dichas formas de P (Samadi, 2006).

Para la determinación del P aprovechable por la planta se han utilizado diferentes métodos de extracción, con el objetivo de generar una solución extractora a semejanza de la acción de las raíces de las plantas, sin embargo, las características químicas y físicas tan diversas de los suelos no permiten la adopción de un método universal de extracción, de ahí la necesidad de calibrar los métodos analíticos con respecto a la producción de un cultivo (Ramírez y Morales, 1989). Por otra parte, el método de análisis de suelo debe extraer la fracción de P potencialmente disponible para la planta sin incluir cantidades significativas de P no disponible (McKenzie y Bremer, 2003).

Tres de los métodos más utilizados en el país y que han sido objeto de estudio, son Bray 1 (Bray y Kurtz, 1945), Olsen (Olsen *et al.*, 1954) y Mehlich III (Mehlich, 1984). El método Bray 1 es recomendado para suelos ácidos porque el fluoruro precipita el Al y hace más soluble el P mientras que Olsen (NaHCO_3 0,5 M), es usado en suelos neutros y calcáreos porque el bicarbonato precipita el Ca e incrementa la solubilidad del P. Sin embargo, Tiessen y Moir (1993) señalaron que el método de Olsen ha sido satisfactoriamente usado tanto en suelos ácidos como alcalinos.

El extractante Mehlich III tiene una composición similar a la de Bray 1, que es el NH_4F (Sotomayor *et al.*, 2004) y parece el más adecuado para estimar la disponibilidad de P en una amplia gama de suelos no calcáreos (Afif y Oliveira, 2005).

En Venezuela se han realizado varios trabajos de correlación y calibración de análisis de P, Bascones y López (1961) trabajaron con suelos neutros a ligeramente alcalinos, de la colonia agrícola de Turén y encontraron que los procedimientos de extracción con agua y con una solución de NaHCO_3 dieron la más alta correlación. Pérez *et al.* (1979) utilizaron suelos ácidos del estado Lara y seleccionaron el método Olsen como el más adecuado para dichos suelos, González *et al.* (1977) llegaron a la misma conclusión trabajando con diferentes tipos de suelo del estado Yaracuy. Ramírez *et al.* (1987) y Ramírez *et al.* (1988) encontraron que el P determinado con Bray 1 mostró mejor ajuste con el rendimiento del sorgo y maíz respectivamente, en suelos ácidos, en comparación con Morgan, Olsen y Mehlich I. Ramírez y Morales (1989) compararon cuatro métodos de análisis del P del suelo, para estimar el requerimiento de P_2O_5 por el tomate, encontrando coeficientes de correlación muy parecidos para los métodos Olsen, Mehlich I y Morgan y superiores al obtenido con Bray I, recomendando la utilización del método Olsen.

Sotomayor *et al.* (2004) compararon varios métodos de extracción de P, en suelos de Puerto Rico y observaron una alta relación entre Olsen y Bray, a pesar de las diferencias en los mecanismos de extracción de ambos métodos. Mientras que, Wolf y Baker (1985) observaron que la cantidad de P removida por Bray 1 fue casi tres veces mayor que la extraída por Olsen y explicaron que la relación entre Bray 1 y Olsen para

suelos no calcáreos fue influenciada por la textura de los suelos de diversas regiones de los Estados Unidos.

McKenzie y Bremer (2003) utilizaron el fraccionamiento de P para determinar si cuatro métodos de análisis de suelo P evaluaban con precisión el P disponible y si las predicciones de la respuesta al fertilizante podrían mejorarse mediante la inclusión de otras fracciones de P del suelo. Los resultados mostraron una alta correlación del Pi resina con el P extraído con el método Olsen, concluyendo que este sí mide el P potencialmente disponible para la planta.

Ravindra y Ananthanarayana (1999) encontraron que 63% de la variación del P disponible determinado con Bray 1 fue explicado por el P-Al + P-Fe, y concluyeron que, en los suelos ácidos estudiados, estas fracciones son las que más contribuyen al P disponible estimado con Bray 1. Gikonyo *et al.* (2008) encontraron que Bray 1 extrajo las fracciones de P más lábiles (Pi resina y Pi NaHCO₃), de un suelo ácido.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

Para lograr los objetivos propuestos se realizaron dos experimentos, uno de incubación y otro de respuesta del maíz al P, en condiciones controladas. Se utilizaron doce suelos ácidos, la mayoría con más de diez años de fertilización fosfórica, provenientes de los estados Portuguesa, Yaracuy, Guárico, Barinas, Cojedes y Lara, muestreados a una profundidad de 0 a 20 cm. Cada muestra fue producto de 10 submuestras tomadas al azar.

Los suelos fueron secados al aire y tamizados con una malla de 2 mm. En una sub muestra de cada suelo se realizó el análisis físico y químico, el fraccionamiento secuencial de P y la capacidad de adsorción de P.

IV.1 Análisis físico y químico de los suelos

La textura se determinó por el método de Bouyoucos (Bouyoucos, 1962); el pH en una relación suelo agua 1:2,5; el fósforo disponible por Olsen *et al.* (1954); materia orgánica (Walkley y Black, 1934); calcio intercambiable y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) por el método de Rhoades (1982), el hierro extraído con solución de DTPA en relación 1:2, el aluminio intercambiable extraído con una solución de KCl y determinado por absorción atómica (Barnhisel y Bertsch, 1982) y el magnesio extraído por acetato de sodio 0,125 M a pH 4,2 en relación 1:2.

IV.2 Fraccionamiento de Fósforo

Las fracciones de fósforo en el suelo fueron determinadas con la metodología de Hedley *et al.* (1982) modificada por Tiessen y Moir (1993). El procedimiento se resume en los siguientes pasos:

1. Se pesaron 2 g de suelo en tubos de centrifuga de 50 mL, se agregó 20 mL de agua destilada y 2 tiras de resina de intercambio aniónico y se agitó por 16 horas, luego se sacaron las tiras de resina y se colocaron en un tubo de

- centrífuga de 50 mL, se agregó 20 mL de HCl 0,5 M, se agitó por 16 horas y se determinó el P que corresponde al Pi resina (PiR).
2. La suspensión de suelo y agua restante se centrifugó a 2500 rpm por 10 minutos, se descartó el agua y el suelo se secó en estufa a 70°C. Al suelo seco se agregó 20 mL de NaHCO₃ 0,5 M (pH 8,5) y se agitó por 16 horas. Luego se centrifugó la suspensión de suelo por 10 minutos. El extracto de NaHCO₃ se filtró y se dividió en dos partes: en una se determinó P inorgánico lábil (PiL), (el extracto presentó coloración, se agregaron gotas de H₂SO₄ 7,2 N para precipitar la materia orgánica) y en la otra parte del extracto se determinó el P total mediante una digestión húmeda, colocando 3 mL del extracto en balón aforado de 25 mL, 6 mL de H₂SO₄ 7,2 N y 0,38 g de persulfato de amonio, se tapó con papel aluminio y se colocó en una autoclave a 150 kPa por una hora. En esta última porción del extracto se determinó el P total por colorimetría, y por diferencia con el P inorgánico se determinó el P orgánico lábil (PoL).
 3. Al suelo restante se le agregó 20 mL de agua destilada se centrifugó y se descartó el agua. El suelo se secó y posteriormente se agregó 20 mL de NaOH 0,1 M, y se agitó por 16 horas. Luego la suspensión de suelo se centrifugó por 10 minutos. El extracto de NaOH se pasó a través de papel de filtro y el extracto de NaOH se dividió en dos porciones: en una se determinó P inorgánico moderadamente lábil (PiML), (el extracto presentó una coloración muy oscura, la adición de gotas de H₂SO₄ 7,2 N no precipitó toda la materia orgánica presente; por lo cual, el extracto se dividió en dos partes, en una se adicionó reactivo A y en la otra reactivo B para desarrollo de color) y en la otra porción del extracto se determinó el P total mediante una digestión húmeda (igual que en la fracción de bicarbonato). En la segunda porción del extracto se determinó el P total y por diferencia con el P inorgánico se determinó el P orgánico moderadamente lábil (PoML).
 4. Al suelo restante se le agregó 20 mL de agua destilada se centrifugó y se descartó el agua. El suelo se secó y posteriormente se agregó 20 mL de HCl 1 M, y se agitó por 16 horas. Luego la suspensión de suelo se centrifugó por 10 minutos. El extracto de HCl se filtró y se dividió en dos porciones: en una se determinó Pi ligeramente lábil (PiLL) y en la otra porción del extracto se

determinó el P total mediante una digestión húmeda (igual que en la fracción de bicarbonato). En la segunda porción del extracto se determinó el P total y por diferencia con el P inorgánico se determinó el P orgánico ligeramente lábil (PoLL).

5. Al tubo con el suelo restante se le agregó 20 mL de agua destilada, se centrifugó, se descartó el agua y se secó. Posteriormente se agregó 10 mL de HCl concentrado y se calentó en baño de maría a 80 °C por 10 minutos. Luego se dejó enfriar a temperatura ambiente, se centrifugó por 10 min, se decantó y el sobrenadante se reservó. El suelo restante se lavó con 10 mL de agua destilada, se centrifugó y se adicionó este lavado junto con el sobrenadante de HCl concentrado previamente reservado. El extracto de HCl concentrado se dividió en dos porciones: en una se determinó Pi ocluido (PiO) y en la otra se determinó el P total mediante una digestión húmeda (igual que en la fracción de bicarbonato). En la segunda porción del extracto se determinó el P total por colorimetría, y por diferencia con el P inorgánico se determinó el P orgánico ocluido (PoO).
6. El suelo remanente después de las extracciones anteriores, se secó a 70 °C y se colocó en tubos de digestión con 10 mL de agua destilada, se agregaron 5 mL de H₂SO₄ y dos perlas de ebullición y se digirió en un bloque. Cuando se alcanzó 360 °C se removieron los tubos del bloque y se dejaron enfriar a la mitad del calor; se adicionó 0,5 mL de H₂O₂ y se calentó a 360 °C por 30 min. Se repitió la adición de H₂O₂ hasta obtener un líquido claro. El extracto a temperatura ambiente, se trasvasó y se aforó en un balón de 25 mL, se filtró y luego se determinó P inorgánico recalcitrante o residual (PRC).
7. En todos los extractos el P se determinó por el método de Murphy y Riley (1962).

En el cuadro 1 se presentan los extractantes utilizados y la denominación de cada fracción.

Cuadro 1. Secuencia de extracción y diferentes fracciones de fósforo.

Extractante	Denominación	Fracción determinada
Resina en agua	PiR	Pi Resina, lábil, intercambiable
NaHCO ₃ 0,5 M	PiL y PoL	Pi y Po lábiles
NaOH 0,1 M	PiML y PoML	Pi y Po ligado al Fe y Al moderadamente lábiles
HCl 1 M	PiLL y PoLL	Pi y Po ligado al Ca ligeramente lábiles
HCl concentrado	PiO y PoO	Pi y Po ocluido No lábiles
H ₂ SO ₄ y H ₂ O ₂ concentrados	PRC	P recalcitrante, residual. No lábil.

IV.3 Capacidad de adsorción de P

Para determinar la capacidad de adsorción de P de los suelos se utilizó CaCl₂ 0,01 M como fuerza iónica y KH₂PO₄ para preparar las soluciones de P de concentraciones crecientes de 10 a 100 mg.L⁻¹ (Walbridge *et al.*, 1991). Para inhibir la actividad microbiana durante el proceso de adsorción se añadieron 2 gotas de tolueno previo a la adición de las soluciones de P. Las muestras fueron agitadas por 24 horas y al final del periodo de equilibrio las suspensiones fueron centrifugadas y filtradas y el P en solución se determinó con el método de Murphy y Riley (1962). Para estimar la capacidad de adsorción de P, los datos se ajustaron a la forma lineal de la ecuación de Langmuir (Fox y Kamprath, 1970):

$$C/(x/m) = C/b + 1/kb$$

Donde C es la concentración de P en la solución de equilibrio, x/m la cantidad de P adsorbida por unidad de masa de suelo, b el máximo de adsorción y k una constante relacionada con la energía de adsorción.

IV.4 Experimento de Incubación

Para el experimento de incubación, se usaron dos tratamientos: 1. con fertilizante fosfatado, 200 mg P.kg⁻¹, en forma de superfosfato triple (1P), 2. Sin fertilizante fosfatado (0P). La dosis de P se calculó en base al suelo con el menor contenido de este elemento. El fertilizante se aplicó a 30 kg de suelo garantizando una buena homogenización (Figura 1a).

Se pesaron 5 kg de suelo fertilizado y se colocaron en 6 potes plásticos, se humedecieron a 90% de la humedad disponible y se taparon con plástico para evitar la evaporación. Para calcular la humedad disponible utilizó la curva de retención de humedad de cada suelo y el control se hizo semanalmente para reponer la humedad perdida. Tres de los potes (repeticiones) se usaron para el muestreo a los 1, 35, 70, 105 y 140 días de incubación. La frecuencia de muestreo se determinó tomando como referencia los resultados obtenidos por otros investigadores (Ochwoh *et al.* 2005; Hatono *et al.* 2006) en experimentos de incubación. Las muestras de aproximadamente 300 g se secaron al aire y tamizaron con malla de 2 mm para realizar el fraccionamiento de P (Tiessen y Moir, 1993). Los análisis de suelos originales se tomaron como tiempo cero de la incubación. Los otros tres potes se usaron para sembrar maíz al cabo de los 140 días de incubación.

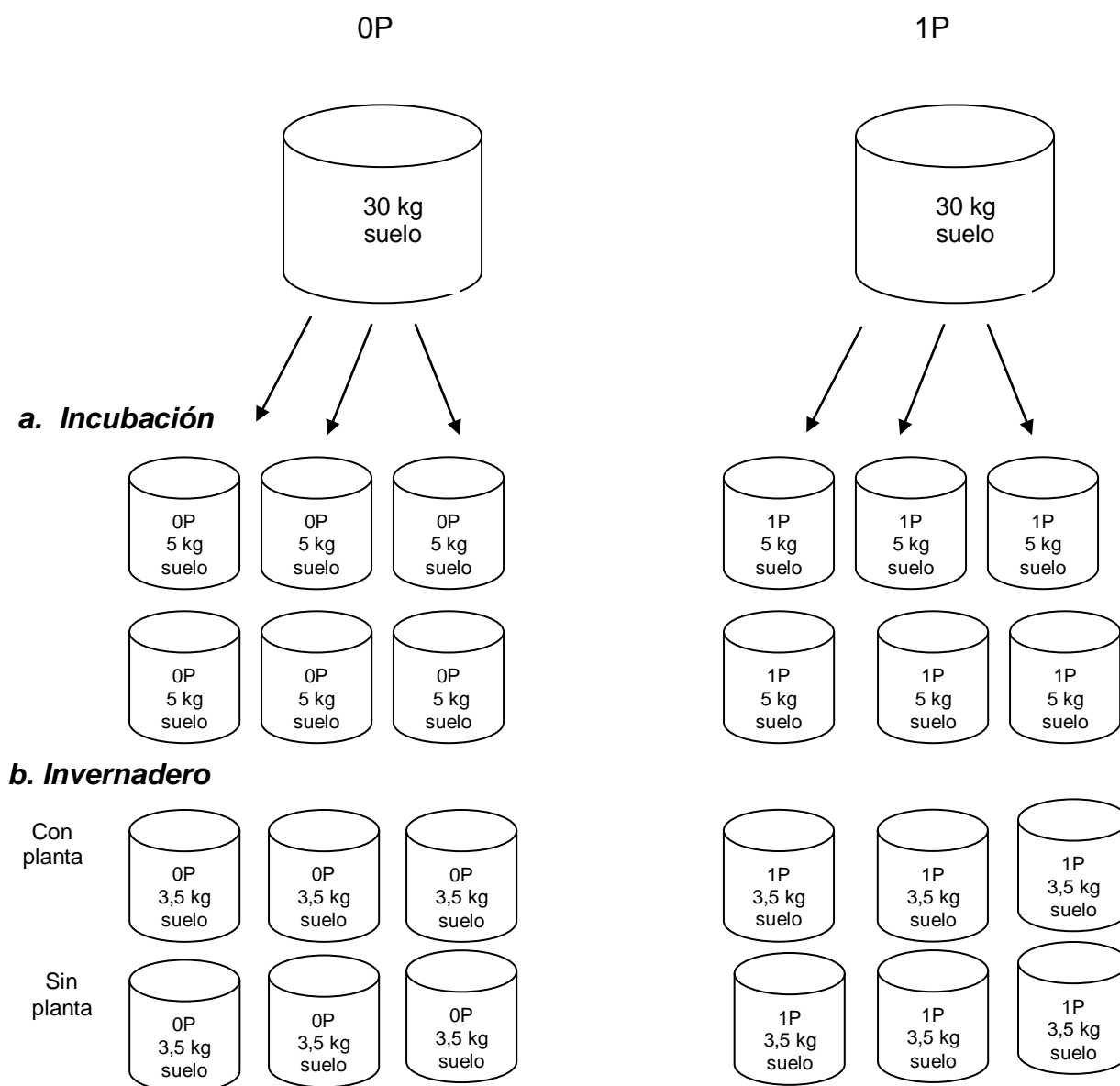


Figura 1. Esquema de tratamientos de incubación (a) e invernadero (b), para cada suelo, sin aplicación de P (0P) y con P (1P).

IV.5 Experimento de invernadero

Para determinar los cambios en las diferentes fracciones de fósforo en el suelo por el efecto del desarrollo del maíz y cuantificar las fracciones de P usadas por la planta, una vez transcurridos los 140 días de incubación de los doce suelos con los dos tratamientos mencionados anteriormente, el suelo remanente proveniente de cada pote

de la incubación (0P y 1P) se secó al aire y se dejaron 3,5 kg de suelo por pote, por cada suelo (Figura 1b). Se realizó una fertilización general con 200 mg.kg^{-1} de nitrógeno y 75 mg.kg^{-1} de potasio. En cada pote se sembraron cuatro semillas de maíz SQ2 del INIA, a los siete días se realizó el entresaque para dejar dos plantas por pote. En una mitad de los potes no se sembró maíz, para contar con un control (Figura 1b). Cada tratamiento fue repetido 3 veces. Los potes se colocaron en forma aleatoria en un invernadero con temperatura controlada con cortina de agua, las temperaturas mínima y máxima fueron 23 y 38°C, respectivamente. El riego se realizó diariamente con agua desmineralizada para mantener la humedad entre 30 y 90% de la humedad disponible. Las plantas se cosecharon 35 días después de la siembra, cortando cada una a 1 cm sobre la superficie del suelo, luego se secaron a 70 °C por 48 horas y se pesaron para determinar la materia seca. Las muestras de tejido fueron molidas en un molino con tamiz de 1 mm y luego digeridas con ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno (Thomas *et al.*, 1967). En el extracto obtenido se determinó P por el método espectrofotométrico de molibdato de amonio (Murphy y Riley 1962).

En la cosecha se tomaron dos muestras de suelo por pote, utilizando un cilindro de 2,5 cm de diámetro, desde la superficie del suelo hasta la base del mismo. Una de las muestras de suelo se analizó para conocer, las fracciones de fósforo (Tiessen y Moir, 1993) para compararla con las fracciones antes del desarrollo del maíz y determinar la contribución de cada fracción de fósforo del suelo, al P absorbido por la planta y así estimar la procedencia del fósforo absorbido por el maíz a los 35 días de cultivo.

La otra muestra se utilizó para medir la longitud radical y relacionar el desarrollo radical del maíz con las diferentes fracciones de fósforo del suelo, para ello las raíces se separaron del suelo y se lavaron con agua corriente usando tamices de 3, 2 y 1 mm. Con la ayuda de una pinza se recogieron las raíces y se determinó la longitud radical por el método de la cuadrícula (Tennant 1975).

Con el objeto de correlacionar el fósforo disponible extraído por los métodos de Bray I, Olsen y Mehlich III con el fósforo absorbido por la planta, la materia seca y las

fracciones de fósforo en el suelo, en las muestras de suelo obtenidas en el experimento de incubación y de invernadero, se determinó el fósforo disponible por los métodos indicados.

IV.6 Diseño del experimento

Para el experimento de incubación el diseño fue completamente aleatorizado con un arreglo factorial de dos factores: Fertilización con dos niveles 0P y 1P y tiempo 0, 1, 35, 70, 105 y 140 días. Cada tratamiento se repitió 3 veces. Cada suelo representó un experimento.

Para el experimento de invernadero con planta, el diseño experimental fue completamente aleatorizado con dos tratamientos, 0P y 1P, y 3 repeticiones.

IV.7 Análisis de los resultados

Análisis estadísticos

A los datos obtenidos se les verificó el cumplimiento de los supuestos básicos de normalidad, homogeneidad, aditividad e independencia y luego se realizó el análisis de la varianza, la prueba de medias de Tukey y los análisis de correlación y regresión, todos, a un nivel de significancia $P < 0,05$. Para realizar estos análisis se utilizaron los paquetes estadísticos Infostat versión 2.0 (InfoStat, 2002) y SPSS Statistics 20.

Cálculo del fósforo recuperado en cada fracción:

Para estimar el destino del P aplicado se calculó el porcentaje de P recuperado en cada una de las fracciones en los diferentes tiempos de incubación y se utilizó como referencia el testigo correspondiente a cada tiempo. Para ello se utilizó la siguiente fórmula:

$$\%P_{rec.} = [(1P - 0P) / 200] * 100$$

Donde P rec. = P recuperado, 1P= P extraído del suelo con aplicación de P, expresado en mg.kg⁻¹, 0P= P extraído del suelo sin aplicación de P, expresado en mg.kg⁻¹ y 200 es la dosis de P aplicada al suelo, en mg.kg⁻¹.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los suelos utilizados para los experimentos provienen de diferentes zonas agrícolas del país, con diferente manejo en cuanto a cultivo y años de fertilización (Cuadro 2). Todos los suelos son moderadamente ácidos (Cuadro 3), con diferentes texturas, con un contenido de P disponible que varió de 6 mg.kg⁻¹ en el suelo Cam a 265 mg.kg⁻¹ en el suelo Cub. Según los criterios de interpretación señalados por Gilabert *et al.* (1990) el calcio varió de valores bajos, 42 mg.kg⁻¹ en S a muy alto, 2000 mg.kg⁻¹ en B2 y el magnesio de 10 mg.kg⁻¹ en V a medio en B2, 77 mg.kg⁻¹. La materia orgánica baja en V, 0,94 y medio en Cub, 3,53. La CIC de los suelos fue muy baja en V, 4,1 cmol.kg⁻¹, a alta en Cub, 21,9 cmol.kg⁻¹ y el contenido de aluminio varió entre 0,01 mg.kg⁻¹ en B2, hasta 0,85 mg.kg⁻¹ en B.

Según las características de los suelos (Cuadro 3), los mismos presentan diferentes niveles de fertilidad, siendo más bajo en V y el más alto en B2. El pH de B2 es el más alto, 6,76, lo que explica que el Al intercambiable en dicho suelo sea menor en comparación al resto de los suelos. Por otra parte, el pH mayor a 5,5 favorece la disponibilidad del P.

En cuanto a la clasificación taxonómica, los suelos corresponden a los órdenes inceptisol, alfisol y ultisol. Entre los ultisoles, suelos caracterizados por baja fertilidad (Casanova, 2005), llama la atención Cub, que presenta altos valores de CIC, %MO, Ca y P lo que se atribuye al manejo del suelo (Cuadro 2) basado en una fertilización excesiva, aplicación de fertilizante orgánico y encalado.

Por otra parte, los menores valores de P disponible en los suelos Cam, VP y V son probablemente debido, en el caso de Cam, a que este suelo no se fertilizó en los últimos dos años anteriores al muestreo (Cuadro 2), mientras que en VP y V al contenido de Fe y Al que forman compuestos con el P disminuyendo la disponibilidad de este último elemento.

V.1. Distribución de las fracciones de fósforo en los suelos originales

La distribución de las fracciones de fósforo en los suelos al momento del muestreo se observa en el cuadro 4.

El P total (obtenido por sumatoria de todas las fracciones de P) fue mayor en el suelo Cub, 2576 mg.kg^{-1} , seguido por el suelo Pald, 793 mg.kg^{-1} , y el valor más bajo correspondió al suelo V, 159 mg.kg^{-1} (Cuadro 4). Estos valores de P total son comparables a los reportados por otros investigadores, para suelos ácidos con diferentes niveles de fertilización (McKenzie y Bremer, 2003; Hernández-Valencia, 2008). Al respecto, Frossard *et al.* (2000) mencionaron que el P total en los suelos, por lo general, varía entre 100 y 3000 mg.kg^{-1} .

De acuerdo con Fassbender y Bornemisza (1987) los grandes rangos en el contenido de P pueden ser debidos a la heterogeneidad del material parental, al desarrollo de los suelos y a otras condiciones edafológicas. La diferencia en el contenido de P total de los doce suelos evaluados es atribuible a las características fisicoquímicas y al manejo de los mismos, principalmente a la fertilización, tal es el caso del suelo Cub. (Cuadro 2) que recibió altas dosis de fertilizante fosfatado, lo que pudiera ser el origen del alto contenido de P total (Cuadro 4).

El P_i total representó entre 28,99 y 78,85% del P total (Cuadro 5) mientras que el P_o total varió de 16,03 a 36,02%. Hernández-Valencia y Bautis (2005) trabajando con dos suelos ácidos del país, también encontraron que el P_i fue mayor que el P_o . Los porcentajes de P_i y P_o variaron de 78,85 y 16,03 para Cub y de 29,75 y 36,02 para Cam, respectivamente (Cuadro 5).

Cuadro 2. Historial de uso y manejo de los suelos para el momento del muestreo.

Suelo	Ubicación	Cultivo	Tiempo de manejo	Fertilización y enmiendas
Cubiro (Cub)	Finca La Cuibas. Cubiro. Edo Lara	Papa	20 años	12-12-12 400 kg.ha ⁻¹ Urea: 250 kg.ha ⁻¹ Nitrato de calcio: 150 kg.ha ⁻¹ y Gallinazo 12.000 kg.ha ⁻¹ . Encalado hace 1 año.
Barinas (B)	Ciudad Bolivia. Edo. Barinas	Maíz	10 años	14-14-14 250 kg.ha ⁻¹ Urea: 250 kg.ha ⁻¹
Portuguesa (Port)	Finca Toro gacho. Ospino. Edo. Portuguesa	Caña de azúcar	5 años	16-16-16 250 kg.ha ⁻¹ Urea: 250 kg.ha ⁻¹
Paldillo (Pald)	Finca Paldillo. Ospino. Edo. Portuguesa	Maíz	15 años	16-16-16 300 kg.ha ⁻¹ Urea: 250 kg.ha ⁻¹
Uribeque (Uri)	Serie Uribeque Edo. Yaracuy	Maíz y posterior pastoreo.	12 años	15-15-15 350 kg.ha ⁻¹ Urea: 200 kg.ha ⁻¹
Ramón (R)	Finca Las Velas. Yaritagua. Edo. Yaracuy	Maíz- Frijol	18 años	15-15-15 400 kg.ha ⁻¹ Urea: 200 kg.ha ⁻¹
Guárico (G)	Finca Las Guacamayas. El Sombrero. Edo. Guárico	Maíz Pastoreo de restos de cosecha.	10 años	10-20-20 400 kg.ha ⁻¹ Urea: 350 kg.ha ⁻¹
Silbón (S)	Finca El Silbón. Municipio Espino Edo. Guárico	Maíz	10 años	10-20-20 350 kg.ha ⁻¹ Urea: 300 kg.ha ⁻¹
Violetas (V)	Las Violetas. Municipio Infante. Edo. Guárico	Maíz	14 años	10-20-20 200 kg.ha ⁻¹ Urea: 250 kg.ha ⁻¹
Valle la Pascua (VP)	Valle de la Pascua. Edo. Guárico	Maíz	18 años	10-20-20 200 kg.ha ⁻¹ Urea: 250 kg.ha ⁻¹
Camoruco (Cam)	Fundación La Salle. Municipio San Carlos. Estado Cojedes	Pasto	15 años	2 años o más sin fertilizante Encalado hace 10 años.
Barinas 2 (B2)	Serie Barinas. Edo. Barinas	Maíz	11 años	10-20-20 200 kg.ha ⁻¹ Urea: 300 kg.ha ⁻¹

Cuadro 3. Características de los suelos.

Suelo	Clase textural	%A	%L	%a	pH (1:2,5)	P (mg.kg ⁻¹)	Ca (mg.kg ⁻¹)	M.O. (%)	CIC cmol.kg ⁻¹	Fe (mg.kg ⁻¹)	Al (mg.kg ⁻¹)	MCA (mg.kg ⁻¹)	Clasificación
Cubiro (Cub)	A	68,4	9,2	22,4	5,10	265	834	3,53	21,9	351	0,54	1000	Ultisol
Barinas (B)	Aa	36,4	9,2	54,4	4,90	14	180	1,99	8,2	310	0,85	250	Alfisol
Portuguesa (Port)	F	16	44	40	5,26	13	304	1,91	12,6	89	0,36	166,66	Inceptisol
Paldillo (Pald)	F	16,6	49,2	34,2	5,10	31	660	2,58	12,3	125,5	0,34	250	Inceptisol
Uribeque (Uri)	Fa	14	20	66	5,42	52	372	1,36	5,2	39,72	0,28	52,63	Alfisol
Ramón (R)	F	8	42	50	5,95	33	380	1,70	4,3	38	0,15	90,91	Alfisol
Guárico (G)	Fa	12	32	56	5,56	26	250	1,18	5,8	68	0,08	71,43	Alfisol
Silbón (S)	aF	6	10	84	4,59	35	42	1,03	5,3	242	0,68	100	Ultisol
Violetas (V)	aF	6	8	86	4,50	11	56	0,94	4,1	115	0,66	62,5	Ultisol
Valle la Pascua (VP)	A	70,4	9,2	20,4	5,2	8	149	1,71	14,0	36,36	0,64	333,33	Ultisol
Camoruco (Cam)	Fa	8,4	35,6	56	4,37	6	261	1,27	4,4	142	0,20	142,86	Alfisol
Barinas 2 (B2)	FAa	24,9	9,2	66,4	6,76	33	>2000	1,85	9,1	16	0,01	250	Alfisol

M.O.: Materia orgánica, MCA: Máxima capacidad de adsorción de P.

Cuadro 4. Distribución de las fracciones de fósforo (mg.kg^{-1}) en los doce suelos originales.

Fracciones	Cub.	B	Port.	Pald	Uri	R	G	S	V	VP	Cam	B2
PiR*	31,76 h	4,31 e	3,38 g	13,24 g	42,07 f	30,90de	18,23 e	10,04 fg	3,16 ef	0,69 h	0,75 g	30,63 g
PiL	224,96 d	18,67d	15,92 f	35,88 f	64,80d	35,21d	35,30bc	38,45c	9,44d	11,84f	7,80 e	34,70f
PiML	1015,47 a	47,10c	81,91b	151,91b	124,97a	32,22d	34,33cd	47,44b	11,73cd	62,91d	16,84d	74,65c
PiLL	208,61 e	9,24e	37,85d	116,69 c	28,45g	32,26d	13,70f	7,47gh	3,43ef	6,28g	7,79e	78,61b
PiO	550,49 b	48,81c	127,94a	183,07 a	110,63b	44,39c	30,54d	38,36c	18,46b	101,46b	57,21c	46,39e
Pi Total	2031,29	128,13	267	500,79	370,92	174,98	132,10	141,76	46,22	183,18	90,39	264,98
PoL	30,41 h	21,32d	23,61e	26,54 f	13,81h	16,27f	14,04f	25,87e	5,98e	16,18f	15,05d	24,46h
PoML	326,92 c	57,87b	72,12c	96,74 d	55,87e	66,36a	33,95cd	32,09d	13,88c	82,25c	75,00b	62,53d
PoLL	3,40 i	3,50e	2,49g	1,42 h	6,72i	3,52g	5,44g	4,39h	1,57g	3,09gh	3,75ef	2,02i
PoO	52,32 g	22,63d	38,61d	55,44 e	49,22e	26,73e	38,74b	12,68f	18,01b	35,16e	15,62d	25,37h
Po Total	413,05	105,32	136,83	180,15	125,62	112,87	92,17	75,04	39,44	136,67	109,42	114,38
PRC												
Residual	131,89 f	110,77a	121,29 a	112,40 c	83,97c	56,80b	99,78a	57,22a	73,70 a	117,91a	103,96a	89,70a
P TOTAL	2576,23	344,22	525,13	793,34	580,51	344,65	324,05	274,02	159,36	437,77	303,77	469,06

*R: resina; L: Lábil (NaHCO_3); ML: moderadamente lábil (NaOH); LL: ligeramente lábil (HCl 1M); O: ocluido (HCl concentrado); RC: recalcitrante (H_2SO_4). Medias dentro de una misma columna seguidas por una misma letra no son significativamente diferentes según Tukey.

Cuadro 5. Porcentajes de cada fracción de P respecto al total de cada suelo.

	Cub	B	Port	Pald	Uri	R	G	S	V	VP	Cam	B2
PiR*	1,23	1,25	0,64	1,67	7,25	8,97	5,63	3,66	1,98	0,16	0,25	6,53
PiL	8,73	5,42	3,03	4,52	11,16	10,22	10,89	14,03	5,92	2,71	2,57	7,40
PiML	39,42	13,68	15,60	19,15	21,53	9,35	10,59	17,31	7,36	14,37	5,54	15,92
PiLL	8,10	2,69	7,21	14,71	4,90	9,36	4,23	2,72	2,15	1,43	2,56	16,76
PiO	21,37	14,18	24,36	23,08	19,06	12,88	9,43	14,00	11,58	23,18	18,83	9,89
Pi Total	78,85	37,22	50,84	63,13	63,90	50,78	40,77	51,72	28,99	41,85	29,75	56,5
PoL	1,18	6,19	4,50	3,35	2,38	4,72	4,33	9,44	3,75	3,70	4,95	5,22
PoML	12,69	16,81	13,73	12,19	9,62	19,25	10,48	11,71	8,71	18,79	24,69	13,33
PoLL	0,13	1,02	0,47	0,18	1,16	1,02	1,68	1,60	0,99	0,71	1,23	0,43
PoO	2,03	6,57	7,35	6,99	8,48	7,76	11,95	4,63	11,30	8,03	5,14	5,41
Po Total	16,03	30,60	26,06	22,71	21,64	32,75	28,44	27,38	24,75	31,22	36,02	24,38
PRC Residual	5,12	32,18	23,10	14,17	14,47	16,48	30,79	20,88	46,25	26,93	34,22	19,12
P TOTAL	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

*R: resina; L: Lábil (NaHCO_3); ML: moderadamente lábil (NaOH); LL: ligeramente lábil (HCl 1M); O: ocluido (HCl concentrado); RC: recalcitrante (H_2SO_4).

La cantidad de cada forma de P depende de la naturaleza de los suelos (Reddy *et al.*, 1999). Dentro de las fracciones inorgánicas, PiO fue la fracción predominante en seis de los suelos (Port, Pald, R, V, VP y Cam) (Cuadro 4) y representó entre 11,58% hasta 24,36% del P total (Cuadro 5), seguido por el PiML que fue la fracción inorgánica más alta en los suelos Cub, Uri y S, 17,31% hasta 39,42%, mientras que el PiL predominó sólo en el suelo G y el PiLL en el suelo B2. PiR fue la fracción de P estadísticamente más baja en todos los suelos (Cuadro 4), representó entre 0,16 a 8,97% del P total (Cuadro 5). Otros investigadores también encontraron, en suelos ácidos, que el Pi extraído con HCl concentrado fue la fracción más grande seguida por PiML (Cardoso *et al.*, 2003) y que la contribución del PiR al P total del suelo es baja (Ivanoff *et al.*, 1998; McGrath *et al.*, 2001, Hernández-Valencia y Bautis, 2005).

En cuanto a las formas orgánicas, PoML fue la fracción predominante en los suelos Cub, B, Port, Pald, R, S, VP, Cam y B2 (Cuadro 4), representó desde 11,71% hasta 24,69% del P total (Cuadro 5). En un trabajo realizado por Phiri *et al.* (2001), el PoML también fue la fracción más abundante en un suelo ácido. El PoO fue la forma orgánica más alta en los suelos G y V, contribuyendo entre 11,30% y 11,95% al P total de dichos suelos. El PoLL fue la fracción orgánica más pequeña, entre 0,13% a 1,68%. Lo que sugiere que una alta proporción del Po está en formas estables (Wang *et al.*, 2006) y la forma orgánica más lábil, PoL, representa un bajo porcentaje del P orgánico en estos suelos, entre 1,18% a 9,44%.

En este trabajo, el PRC, en ocho suelos fue la fracción de P más grande y estadísticamente mayor al resto de las fracciones, inorgánicas y orgánicas (Cuadro 4), aportando entre 19,12 y 46,25% al P total (Cuadro 5) y fue la segunda y tercera fracción más importante en tres suelos, R, Pald y Uri. Resultados similares fueron reportados por Picone *et al.* (2007), quienes encontraron que el P residual es una fracción importante del P total y, en general, fue superior a la sumatoria de las fracciones de Pi. El PRC en Cub fue la excepción, donde solo representó el 5,12% del P total del suelo. El P residual (PRC), fracción remanente después de la extracción secuencial de P, y definida como no lábil, o la más resistente de las fracciones, representa un alto porcentaje del P total en la mayoría de suelos degradados (Turner *et al.*, 2005).

Al agrupar las fracciones de P según su labilidad o disponibilidad para la planta, las fracciones más lábiles, PiR y PiL y PoL, representan entre 6,57% en el suelo VP y 27,13% en el suelo S (Cuadro 5), las fracciones moderadamente lábiles (Pi y PoML y Pi y PoLL) variaron de 19,21% para V a 60,34% para Cub y las no lábiles (Pi y PoO y PRC) de 28,52% para Cub y 69,13% para el suelo V. Estos valores indican un bajo contenido de P disponible en los suelos y una mayor proporción de P en formas moderadamente lábiles y no lábiles. Subero (2013) evaluó las fracciones de P en suelos ácidos cultivados con arroz y fertilizados con fosfatos, y encontró que en 35 de los 43 suelos estudiados el P lábil (PiR y PiL y PoL) representó menos del 10% del P total.

V.2. Comportamiento de las fracciones Pi y Po por efecto de la aplicación de fósforo al suelo y el tiempo de incubación.

Para ilustrar el comportamiento de las fracciones de P por efecto del tiempo de incubación y la aplicación de P al suelo se trazaron gráficas, y para observar mejor los cambios o tendencias se agruparon los suelos en tres grupos. Para esto se tomó como criterio el contenido de P total. Grupo 1, los de menor contenido de P total, G (324 mg.kg⁻¹), V (159 mg.kg⁻¹), S (274 mg.kg⁻¹) y Cam (304 mg.kg⁻¹). Grupo 2, medio, B (344 mg.kg⁻¹), B2 (469 mg.kg⁻¹), R (344 mg.kg⁻¹) y VP (437 mg.kg⁻¹) y grupo 3 alto, Cub (2576 mg.kg⁻¹), Uri (580 mg.kg⁻¹), Port (525 mg.kg⁻¹) y Pald (793 mg.kg⁻¹). Para comparar el tratamiento sin P (0P) con P (1P) se realizaron las gráficas de ambos tratamientos con la misma escala.

V.2.1 Fracciones de P inorgánico

PiR

La incubación de los suelos sin la aplicación de P (0P), produjo una disminución de PiR en el primer día de incubación y luego continuó disminuyendo o se mantuvo estadísticamente igual hasta los 140 días (Figura 2), sólo en los suelos Cam y VP, no hubo cambios significativos en PiR. Hedley *et al.* (1982) y Yang *et al.* (2002) también encontraron una disminución en PiR, en suelos incubados sin aplicación de P y

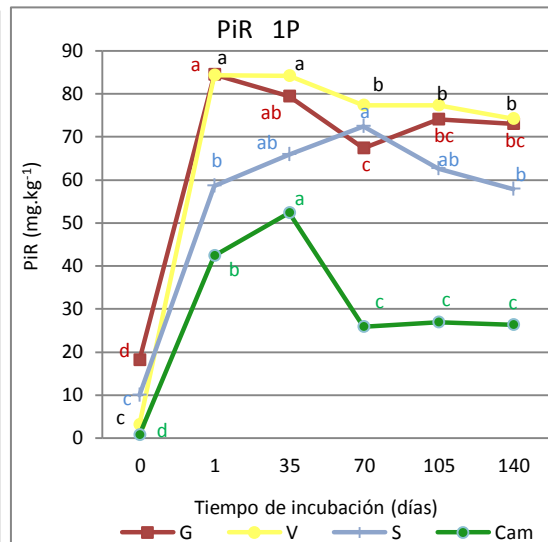
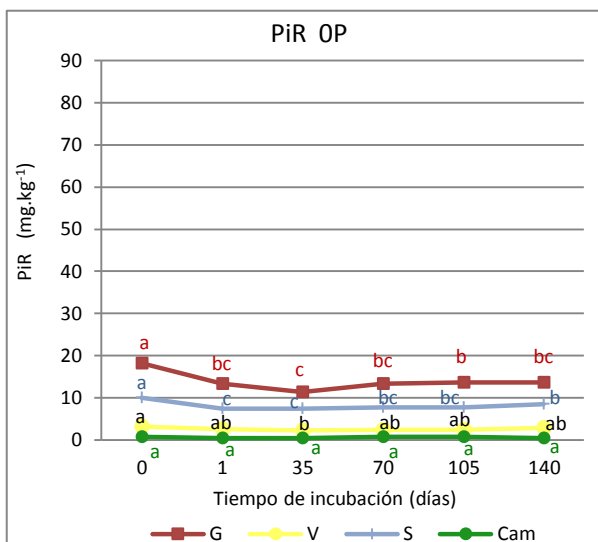
explicaron que debido a la alta labilidad de la fracción resina, ésta es muy sensible a las transformaciones del P en el suelo, a corto plazo.

Los cambios en la fracción resina por la aplicación de P y el tiempo de incubación siguieron el mismo patrón en todos los suelos, a excepción de Cub (Figura 2). Los resultados muestran que el PiR se incrementó significativamente con la aplicación de P al suelo en el término de las primeras 24 horas de incubación, en el suelo Cam este incremento continuó hasta el día 35 y en el suelo S hasta los 70 días, para luego decrecer con el tiempo de incubación (Figura 2) y se estabilizó a partir de los 105 días en casi todos los suelos. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Doula *et al.* (1996) quienes explicaron que gran parte del P soluble aplicado al suelo es adsorbido y precipitado rápidamente y que la concentración en solución continua disminuyendo por un periodo de tiempo.

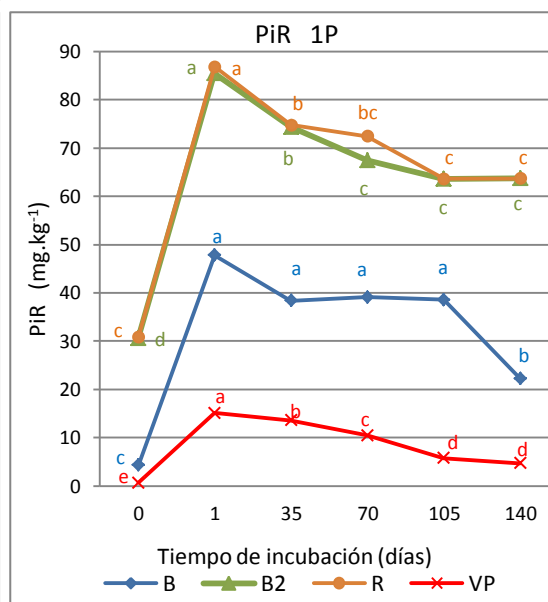
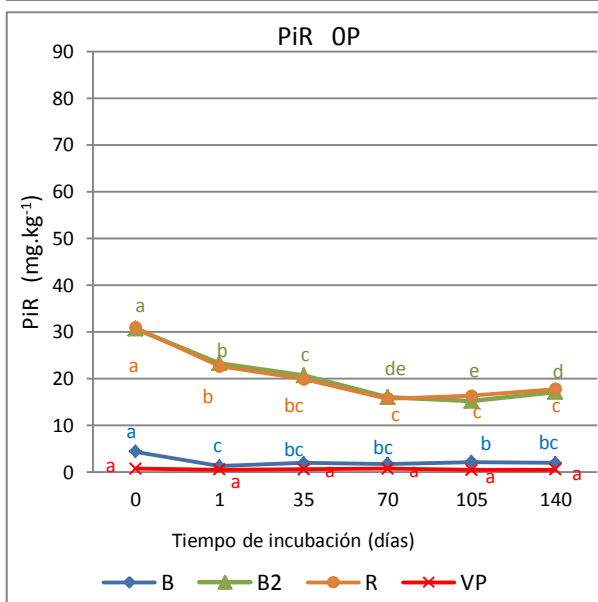
El incremento del PiR, en el primer día de incubación, fue menor en el suelo VP en comparación con los otros suelos y mayor en el suelo V (Figura 2), el suelo Cub fue el único que no mostró incremento en la fracción resina. De acuerdo con Ochwoh *et al.* (2005a) el comportamiento de VP y Cub podría deberse a la alta capacidad de adsorción de P (Cuadro 3). Los suelos que le siguen a VP y Cub en capacidad de adsorción de P fueron Pald, B, Port y Cam, los cuales, mostraron también un menor incremento en la fracción P resina en relación a los demás suelos. Los suelos con menor capacidad de adsorción de P, V, G y Uri, mostraron mayor incremento de la fracción resina en el primer día de incubación. Al respecto, Tchienkoua *et al.* (2010) mencionaron que la acumulación de P en los reservorios lábiles es controlada por la capacidad de adsorción del suelo.

La adsorción de P está relacionada con la textura y el contenido de materia orgánica. Los suelos con mayor contenido de arcilla presentan mayor adsorción del P porque hay más sitios para la adsorción específica del fosfato y por lo tanto disminuye la disponibilidad del mismo (Gatiboni *et al.*, 2010). La mayor capacidad de adsorción de P de los suelos Cub y VP en comparación con los otros suelos, puede ser atribuida al mayor contenido de arcilla, materia orgánica, CIC y a la presencia de Fe (Cuadro 3).

Grupo 1



Grupo 2



Grupo 3

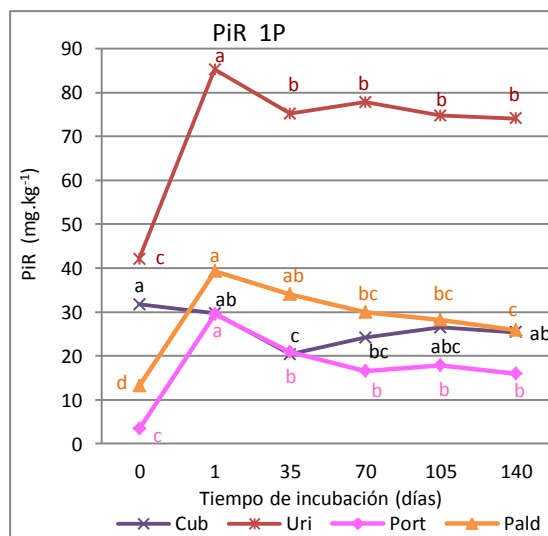
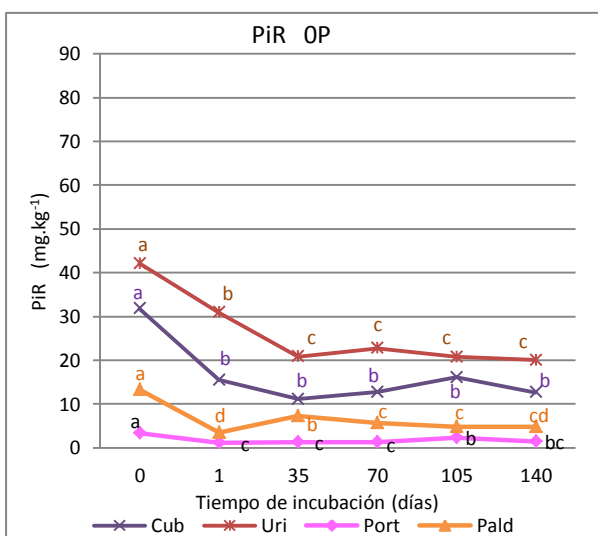
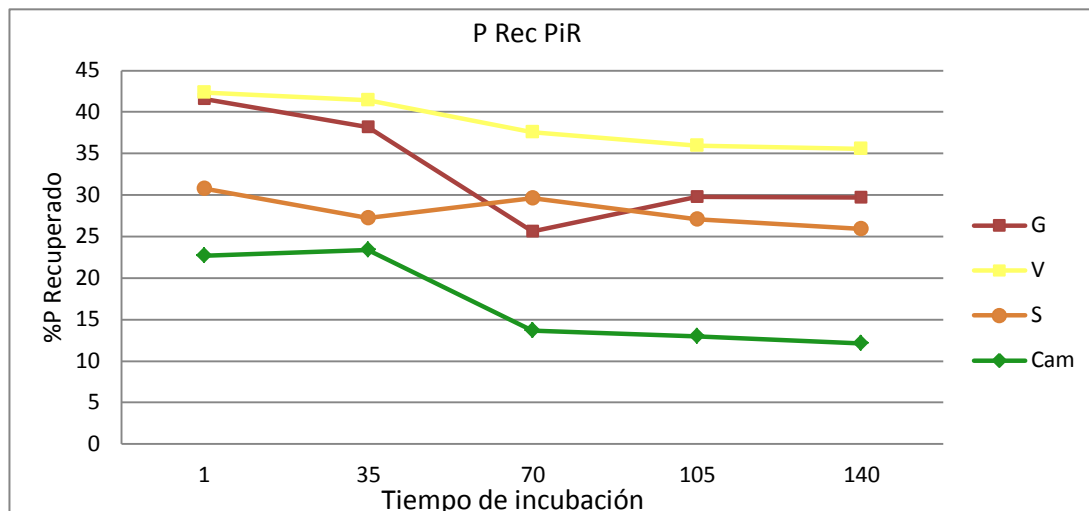


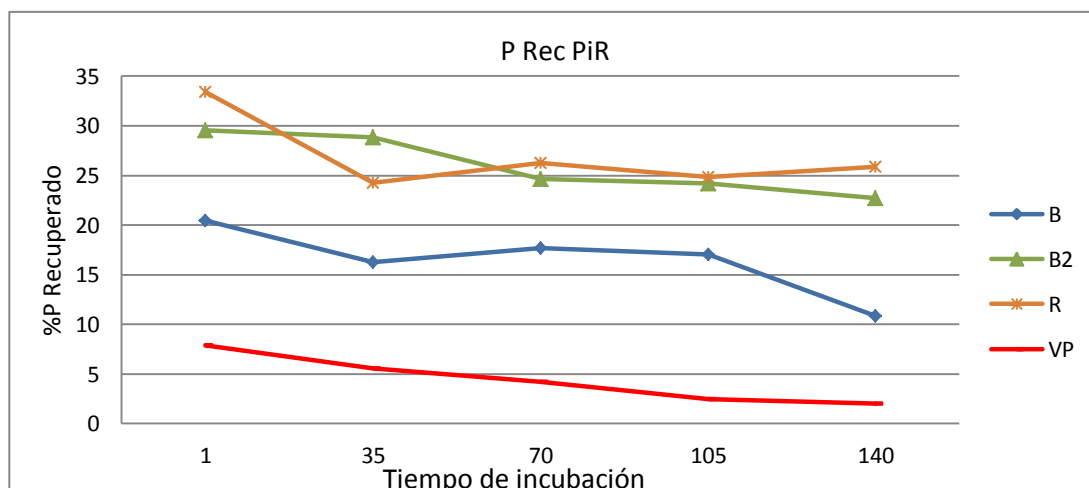
Figura 2. Cambios en PiR en los tres grupos de suelos, en diferentes tiempos de incubación, sin aplicación de P (0P) y con aplicación de P (1P). Letras iguales en la misma línea no son significativamente diferentes, según Tukey.

El P recuperado representa el porcentaje de P aplicado al suelo que pasa a formar parte de una determinada fracción de P (Ibia *et al.*, 2009 y Gatiboni *et al.*, 2010). El P recuperado como PiR varió entre 5,57 y 42,33%, en el día 1 de incubación (Figura 3) y de 2,00 a 35,56% a los 140 días del experimento. En todos los suelos el P recuperado disminuyó con el tiempo de incubación, lo que indica que al inicio de la incubación, una proporción del P soluble aplicado al suelo pasa a la fracción más lábil pero en el transcurso del tiempo parte del P es trasladado a otras fracciones. Resultados similares fueron encontrados por Ochwoh *et al.* (2005a), en experimentos de incubación. La recuperación de P en la fracción resina fue menor en los suelos con mayor capacidad de adsorción de P, Cub, Pald, B, Port y Cam (Figura 3) y mayor en suelos con menor tendencia a adsorber P, como V, G y R.

Grupo 1



Grupo 2



Grupo 3

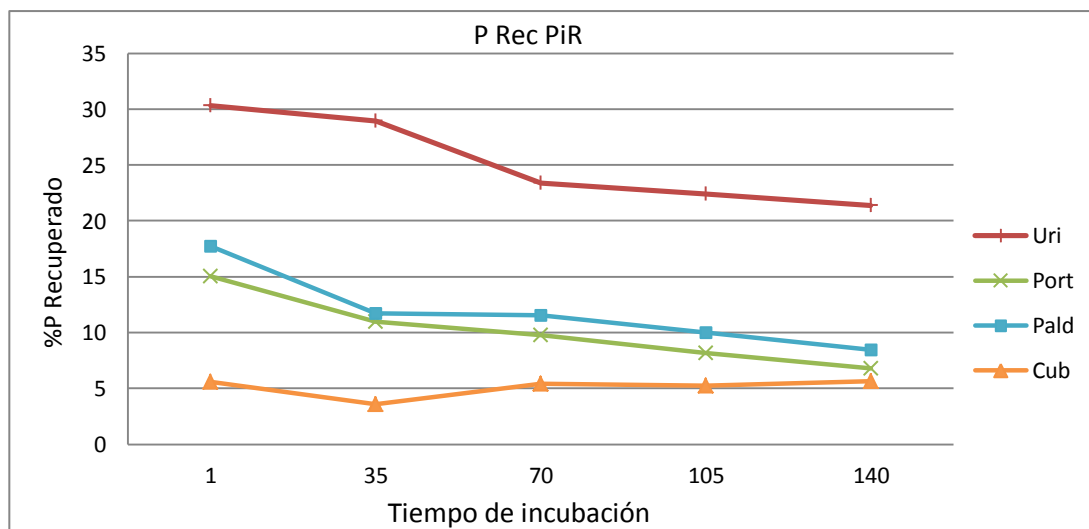


Figura 3. Porcentaje de P recuperado, en los tres grupos de suelos, por la fracción PiR, en los diferentes tiempos de incubación.

PiL

La cantidad de PiL en los suelos, al inicio de la incubación, varió entre 5 y 64,80 mg.kg⁻¹. A excepción de Cub, donde el valor inicial de PiL fue 225 mg.kg⁻¹ (Figura 4).

Los resultados presentados en la figura 4 muestran que en el tratamiento OP la cantidad de PiL permaneció sin cambios en tres de los suelos V, R y Port, (bajo, medio y alto contenido de P total, respectivamente) durante todo el periodo de incubación, mientras que, en el resto, disminuyó en el día 1, luego incrementó y al final de experimento mostró una tendencia a disminuir. Hedley *et al.* (1982) también encontraron una disminución del PiL, en un suelo incubado sin aplicación de P. Según Yang *et al.* (2002), la disminución de las fracciones lábiles de P, se debe a procesos de adsorción, precipitación o inmovilización del P a formas orgánicas. El decrecimiento más pronunciado del PiL en el suelo Cub, sugiere que las características químicas de este suelo, contenido de calcio, materia orgánica, hierro y aluminio (Cuadro 3) favorecen los procesos mencionados anteriormente.

En todos los suelos utilizados la forma PiL se incrementó significativamente ($P < 0,05$) con la aplicación de P (Figura 4), alcanzando el máximo a 35 días de la incubación a excepción del suelo Cub, donde el máximo ocurrió en el día 1 y en Uri donde el incremento continuó y el máximo valor de PiL se registró a los 140 días (Figura 4). Es conocido que la aplicación de fertilizante fosfatado incrementa las fracciones lábiles, al respecto, Linqvist *et al.* (1997) encontraron un incremento en la fracción PiL al aplicar fertilizante fosfatado a un suelo ácido. Ochwoh *et al.* (2005a) también encontraron un aumento significativo del PiL, a solo un día de aplicar P a dos suelos e incubar.

La cantidad de PiL disminuyó significativamente después de 35 días de incubación en todos los suelos donde se aplicó P, a excepción de S y Cub donde disminuyó después de los 70 días y Uri donde no se observó disminución en dicha fracción (Figura 4). Cabe destacar que Uri es el suelo con menor capacidad de adsorción de P (Cuadro 3). Al igual que para PiR la disminución de PiL en los suelos, parece indicar que la pérdida de solubilidad del P está relacionado con la capacidad de

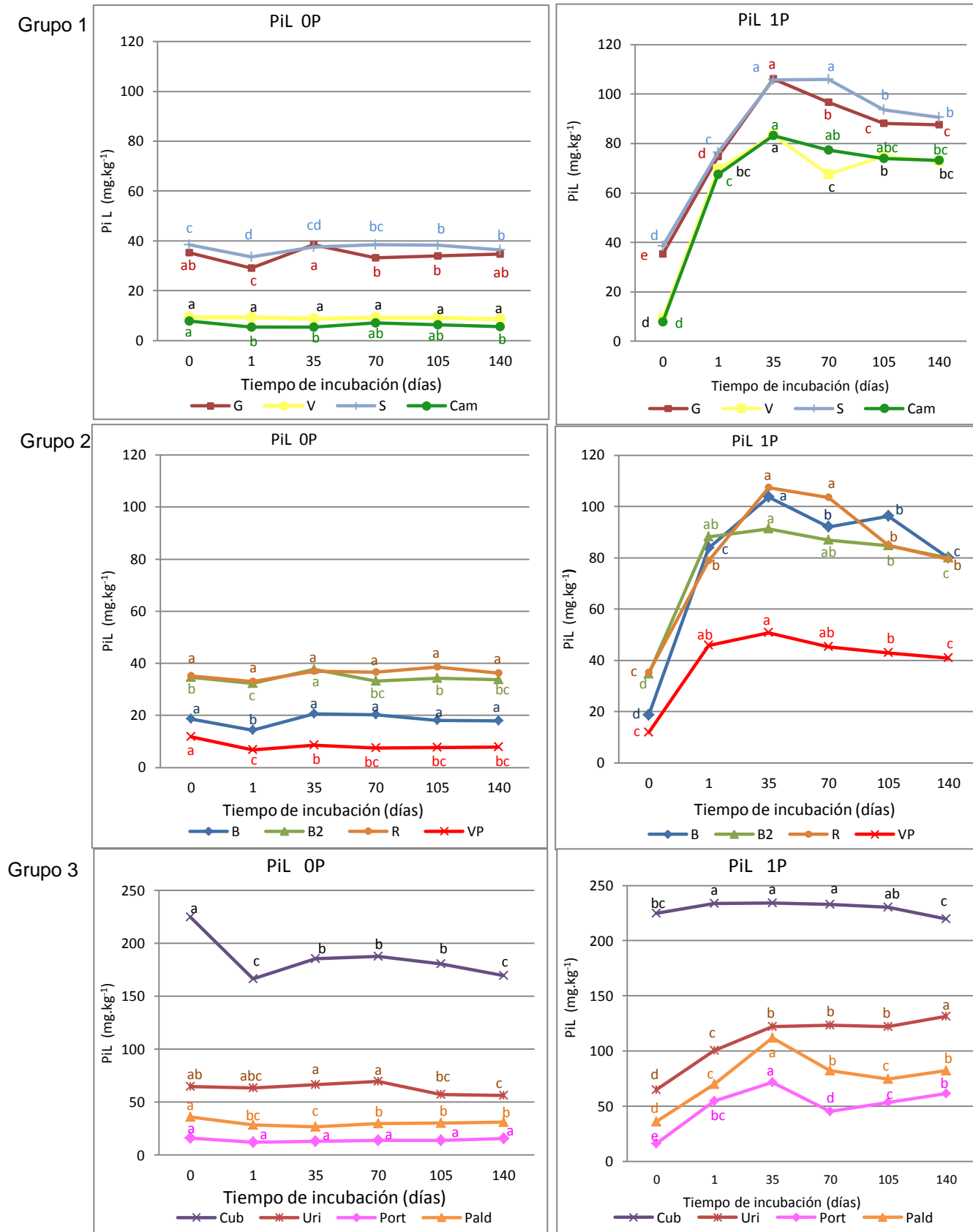


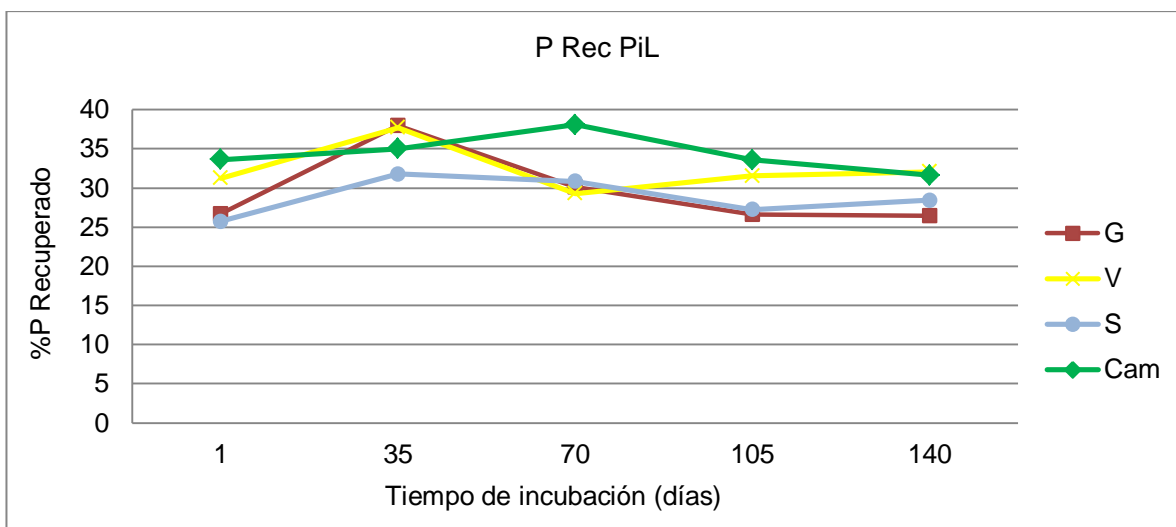
Figura 4. Cambios en PiL en los tres grupos de suelos, en diferentes tiempos de incubación, sin aplicación de P (0P) y con aplicación de P (1P). Letras iguales en la misma línea no son significativamente diferentes, según Tukey.

adsorción, explicada anteriormente. Tchienkoua *et al.* (2010) encontraron que la incorporación de P del fertilizante al PiL fue afectada por la adsorción de P por el suelo. Estos investigadores explicaron que el proceso de adsorción de P disminuye la cantidad de P del fertilizante que va al PiL, pero una vez saturados los sitios de adsorción del suelo, aumenta el ingreso de P a la fracción. Lo que pudiera explicar por qué en varios suelos (S, G, V, Pald y Port) la disminución del PiL se hace menos pronunciada o se detiene.

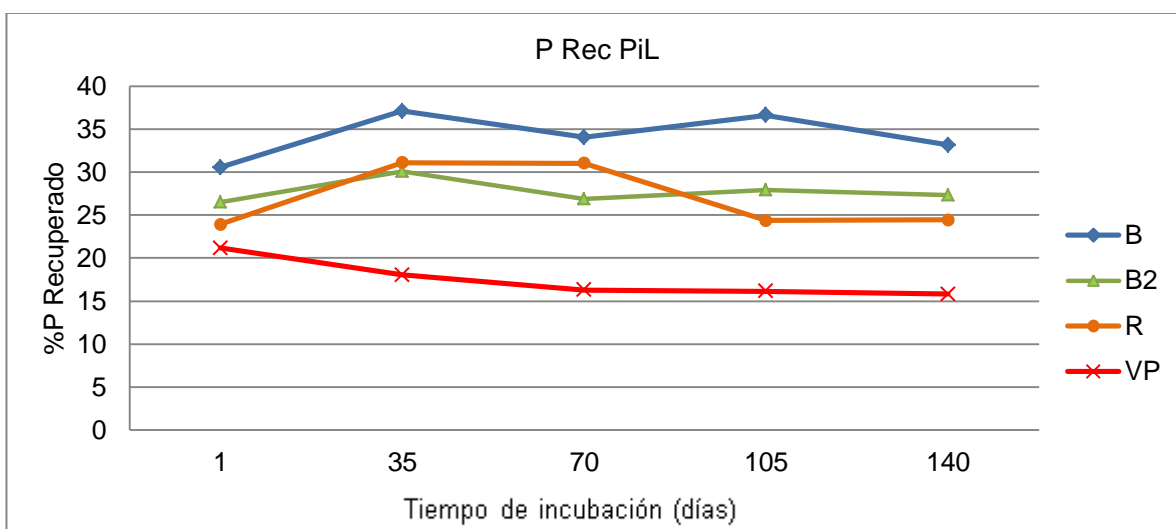
El P recuperado en PiL varió entre 20,78 a 33,62% en el primer día de incubación y se incrementó de 27,90 a 37,72%, el día 35, representando el máximo en la mayoría de los suelos (Figura 5) y luego disminuyó hasta el final del experimento. Solo en los suelos Cub y VP, el P recuperado disminuyó desde el día 1, lo que sugiere que la alta capacidad de adsorción de P de estos suelos (Cuadro 3) hizo que el P acumulado en la fracción bicarbonato a un día de incubación, migrara hacia otras fracciones. Por otra parte, los suelos G y Uri, mostraron una tendencia a incrementar el P recuperado durante todo el periodo de incubación (Figura 5). Cabe destacar que para el suelo Pald, el PiL fue la fracción donde hubo la mayor acumulación del P soluble del fertilizante, 37,24% el día 35 y disminuyó bruscamente alcanzando 18,93% a 105 días de la incubación. Para el resto de los suelos el PiL también fue un reservorio importante del P aplicado en el fertilizante.

En los suelos, B, G, B2, V, R, S, Uri y Cam, más del 50% de P aplicado fue recuperado como PiR y PiL, en los primeros días de la incubación, para luego disminuir, sugiriendo una pérdida de solubilidad del P. Samadi (2002) también observó que una significativa cantidad del P recuperado como PiL cambió a formas menos solubles en 20 días de incubación.

Grupo 1



Grupo 2



Grupo 3

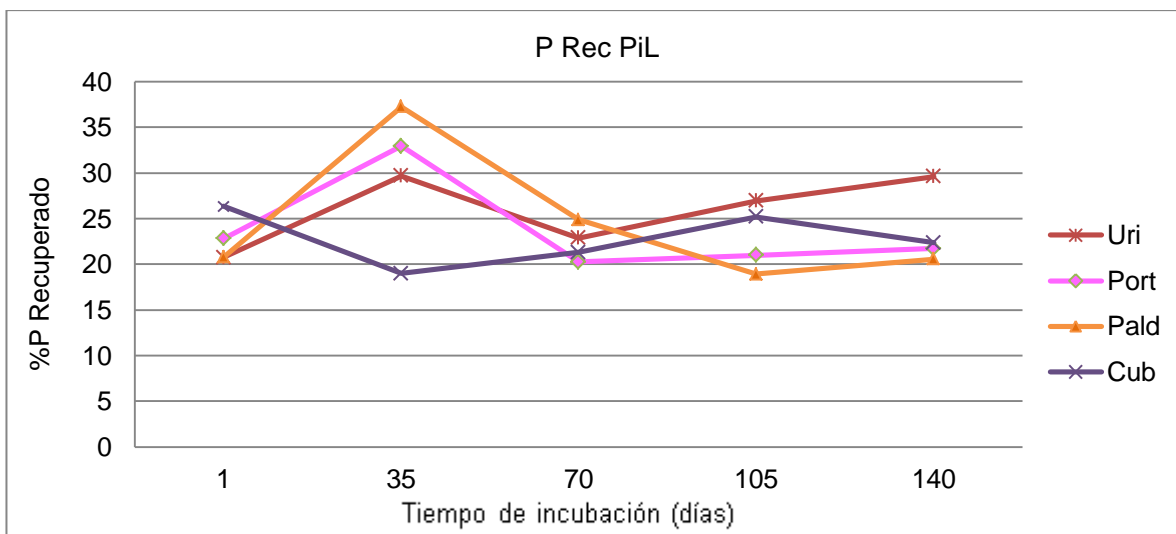


Figura 5. Porcentaje de P recuperado, en los tres grupos de suelos, por la fracción PiL, en los diferentes tiempos de incubación.

PiML

El PiML se incrementó significativamente con el tiempo de incubación en los dos tratamientos, con y sin P, en todos los suelos (Figura 6). Dicha fracción es extraída con NaOH 0,1 M y representa el P adsorbido por la superficie de compuestos de Fe y Al (Hedley *et al.*, 1982 y Tiessen *et al.*, 1984). En el tratamiento sin P el incremento de los valores de PiML refleja que parte del P de las fracciones lábiles formó compuestos con el Fe y el Al, presentes en estos suelos.

El SFT aplicado a los suelos, produjo un aumento en la cantidad de PiML, durante la incubación, lo que se refleja en las curvas de los suelos fertilizados cuyas pendientes son mayores que las de OP. Los valores de PiML, a los 140 días, son aproximadamente el doble en G y VP y en algunos casos tres y seis veces, Cam y V, que los registrados en los suelos sin aplicación de P (Figura 6). Daroub *et al.* (2000) trabajaron con P^{33} , en suelos ácidos, y encontraron que la incorporación del P a la fracción PiML fue muy rápida, entre 6 y 34 días, y se debió a la adsorción del P a los óxidos e hidróxidos de Fe y Al.

El incremento de PiML, en el tratamiento con P, después de los 35 días, coincidió con la disminución registrada en las fracciones PiR y PiL (Figuras 2 y 4), en los suelos de bajo y medio contenido de P total. La conversión de PiR a fracciones menos lábiles en los suelos con aplicación de fertilización fosfórica también fue reportada por Buehler *et al.* (2002), estos investigadores encontraron que el PiR es transformado a otras fracciones como PiL y PiML con el tiempo de incubación. En un experimento de corta duración Gichangi y Mnkeni (2009) atribuyeron la disminución del P resina en el suelo, luego de 56 días de incubación con fertilizante fosfatado, a su conversión a la fracción PiML, que aumentó durante ese tiempo. Daroub *et al.* (2000) también encontraron una transferencia similar de P inorgánico aplicado al suelo, que inicialmente se acumuló en la fracción resina y luego pasó a la fracción de PiML.

A excepción de los suelos Cub y Uri, todos los suelos mostraron una tendencia a aumentar el P recuperado como PiML. El porcentaje de P recuperado en dicha fracción a un día de incubación varió de 2,47 (suelo B2) a 40,27 (suelo Pald) (Figura 7), al final

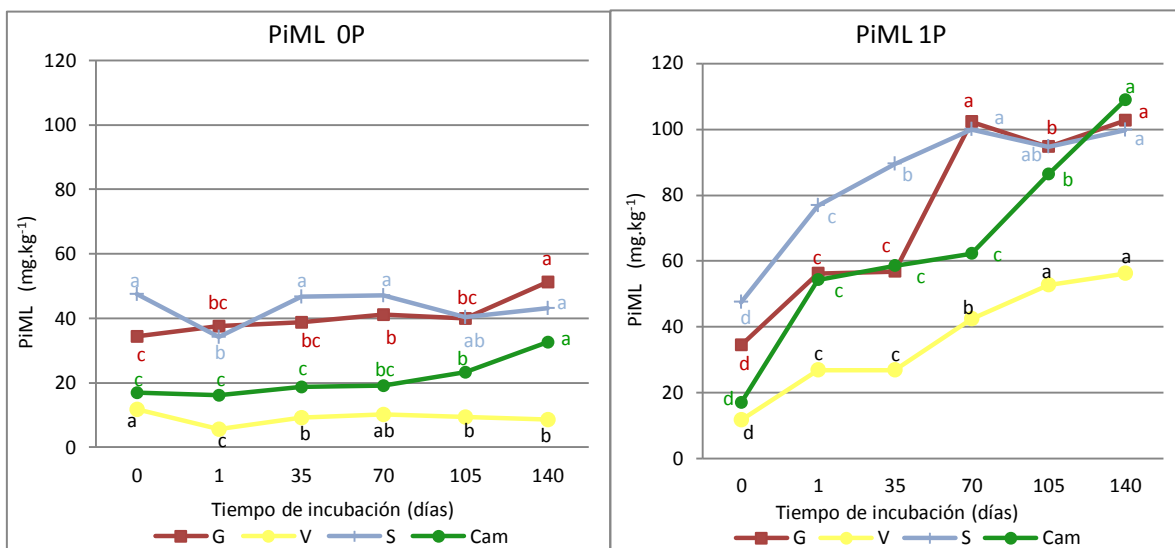
de la incubación (140 días) de 6,55 para B2 a 54,72 para VP. Estos resultados muestran que una significativa proporción del P aplicado al suelo fue transformado a PiML y que la proporción en éste aumenta con el tiempo, en la mayoría de los suelos. Schmidt *et al.* (1996), Linqvist *et al.* (1997); Buehler *et al.* (2002) y Gikonyo *et al.* (2008) también encontraron que PiML fue el principal reservorio o destino del P aplicado en suelos ácidos y explicaron que la adsorción del P ocurre debido a un intercambio de ligandos con grupos hidroxilos situados en la superficie de los hidróxidos de Fe y Al presentes en dichos suelos.

El aumento del P recuperado como PiML en el transcurso de la incubación (Figura 7) explica, en parte, por qué el P recuperado en las formas lábiles disminuye al transcurrir el tiempo (Figuras 3 y 5), lo que indica, que el P pasa a formas menos disponibles para las plantas.

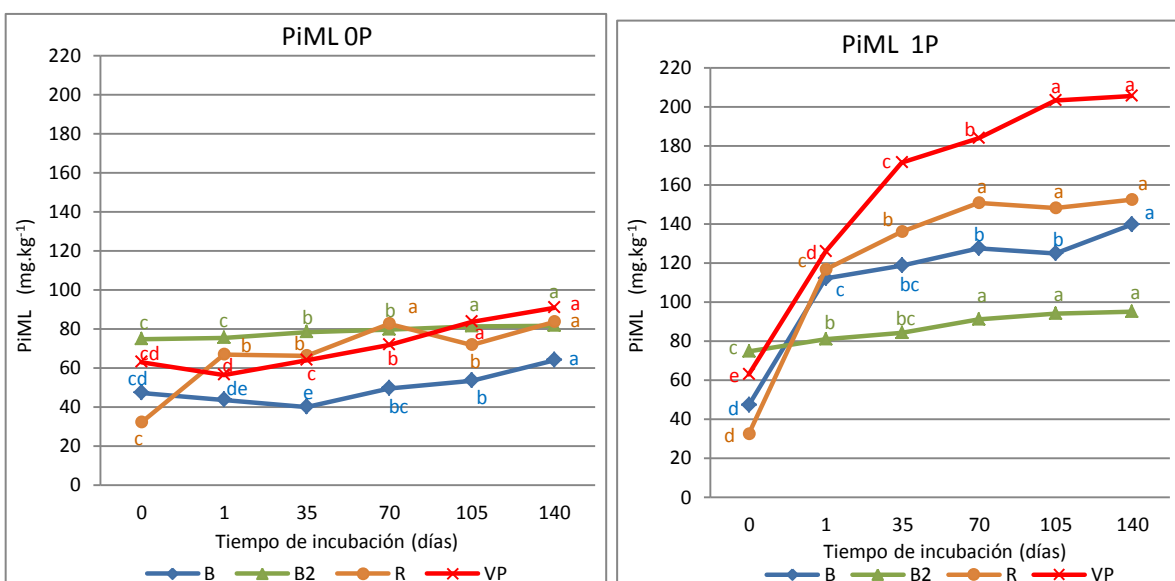
Durante todo el tiempo de incubación VP fue el suelo que presentó los mayores porcentajes de P recuperado como PiML mientras que en B2, los valores fueron los más bajos (Figura 7) lo que es atribuible a las características diferentes de estos suelos (Cuadro 3), específicamente en el contenido de Fe y Al que puedan fijar el P aplicado y almacenarlo en dicha fracción.

El NaOH extrae el Pi asociado a la superficie de oxy e hidróxidos de Fe y Al (Hedley *et al.*, 1982 y Buehler *et al.*, 2002). Todos los suelos utilizados en este estudio son ácidos, era de esperar que esta fracción se incrementara durante la incubación.

Grupo 1



Grupo 2



Grupo 3

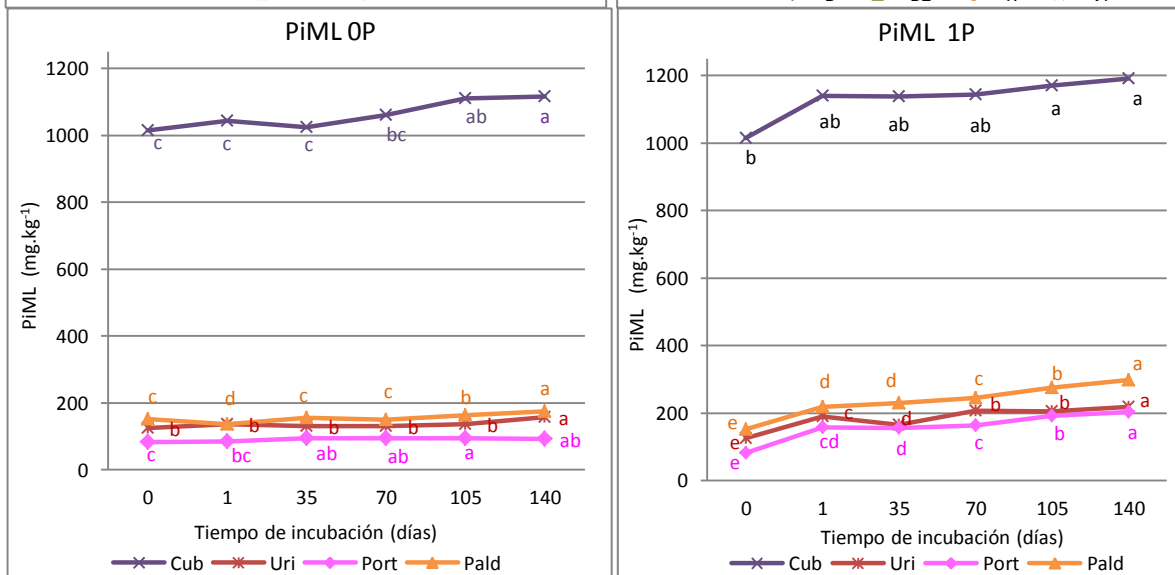


Figura 6. Cambios en PiML en los tres grupos de suelos, en diferentes tiempos de incubación, sin aplicación de P (0P) y con aplicación de P (1P). Letras iguales en la misma línea no son significativamente diferentes, según Tukey.

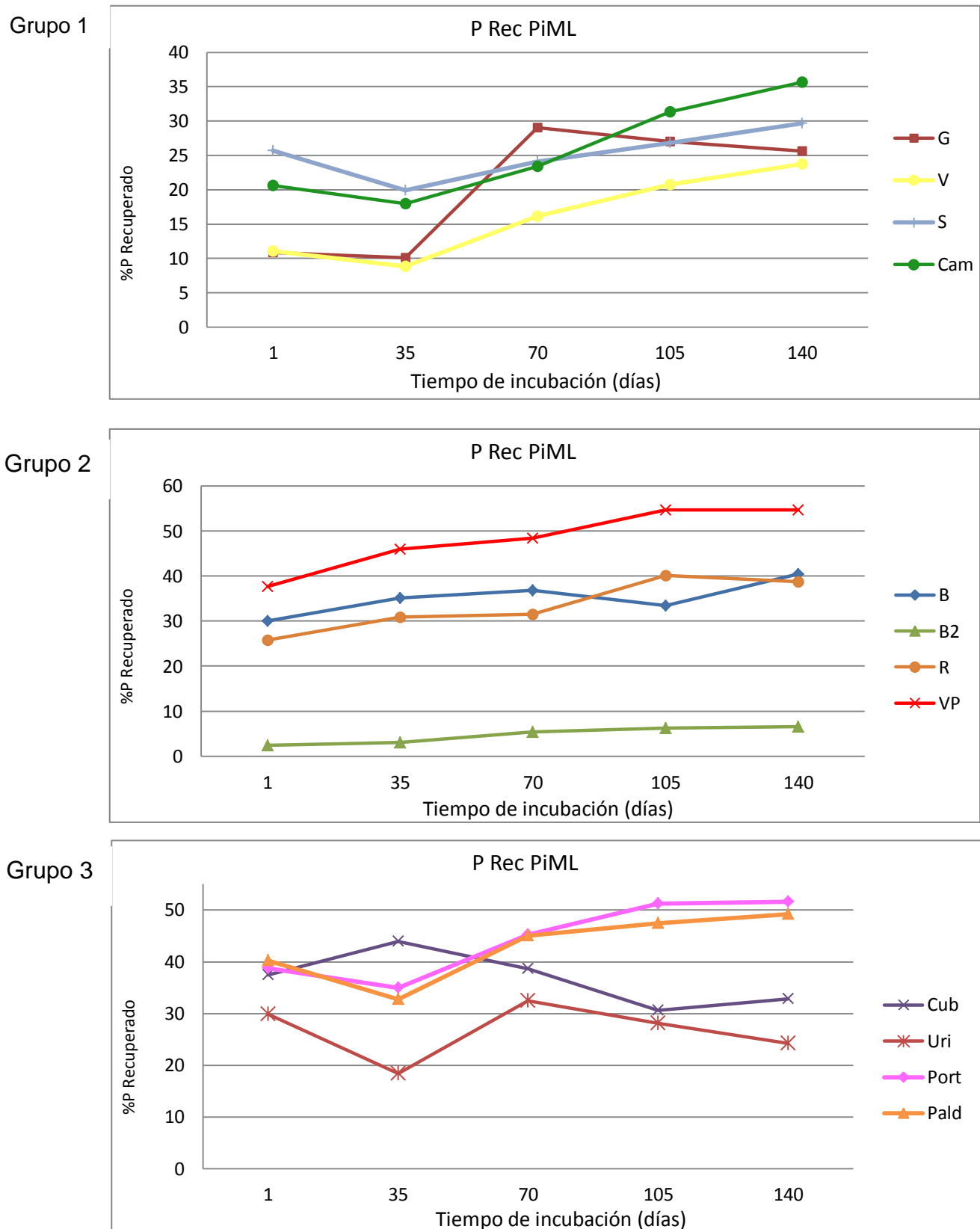


Figura 7. Porcentaje de P recuperado, en los tres grupos de suelos, por la fracción PiML, en los diferentes tiempos de incubación.

PiLL

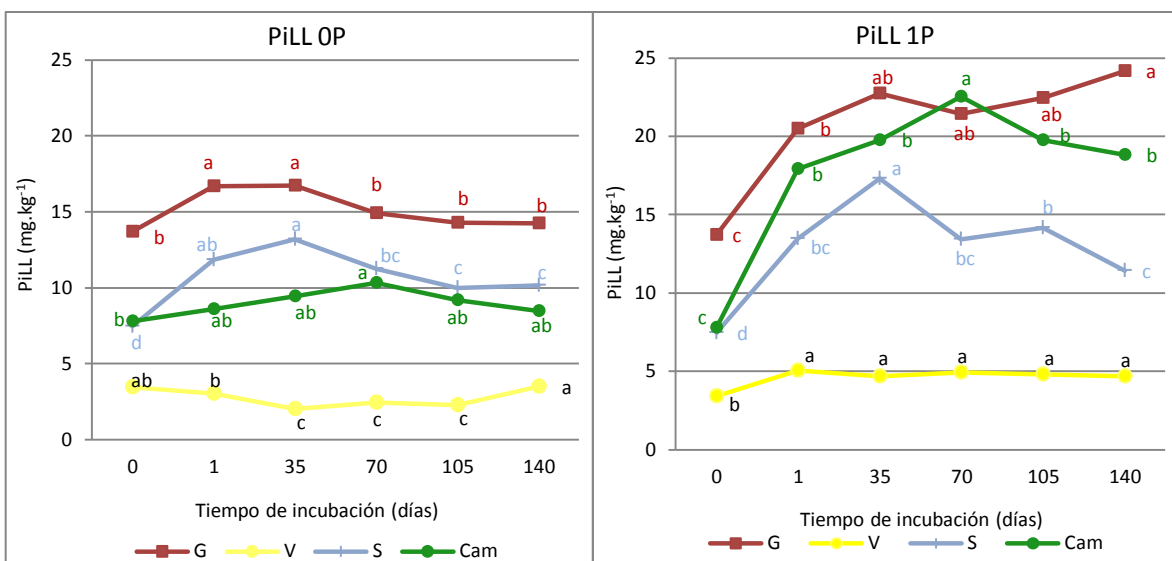
En los suelos G, S, B2, VP y Uri, la incubación sin aplicación de P, produjo un incremento del PiLL entre 1 y 35 días para luego disminuir (Figura 8). Este incremento del PiLL en suelos ácidos incubados, sin P, también fue encontrado por Fernández *et al.* (2006a). Por el contrario, en los suelos V, Pald y Port el contenido de PiLL disminuyó en los primeros días de la incubación y luego aumentó. El suelo Cam no hubo cambios significativos del PiLL. Finalmente, los suelos R y Cub mostraron una disminución del PiLL durante todo el experimento, siendo más pronunciada en Cub.

A excepción del suelo Cub, la aplicación de P produjo un incremento en los niveles de PiLL en todos los suelos (Figura 8). En la mayoría de ellos, el contenido de PiLL registró el aumento el día 1 de la incubación, en algunos casos continuó incrementándose y en otros comenzó a disminuir pero no hasta el nivel inicial.

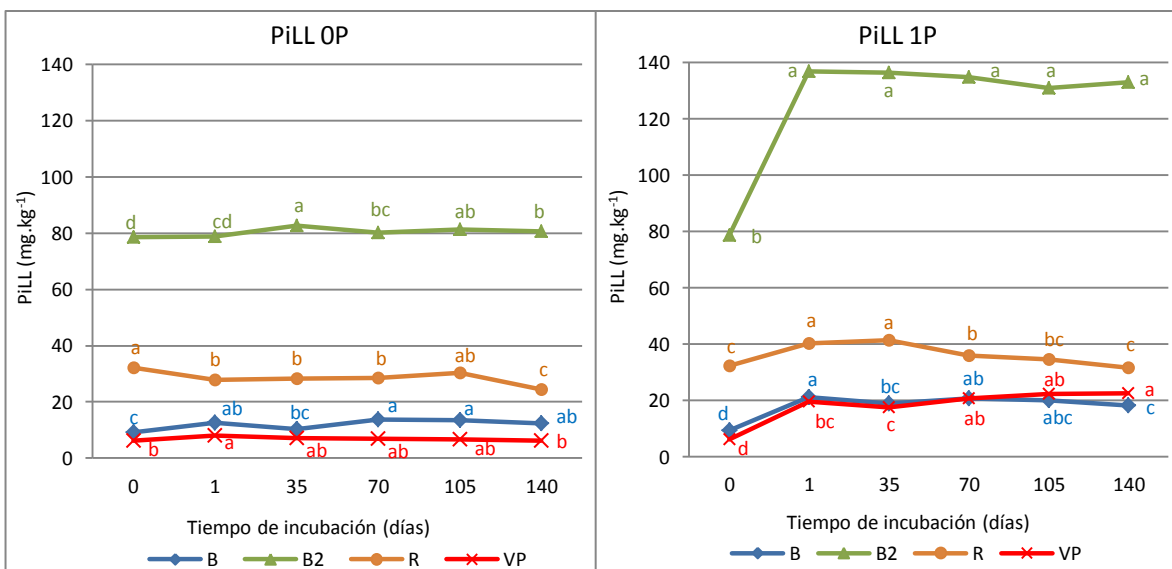
La incorporación del P a la fracción PiLL fue mayor en los suelos B2 y Cub, con un porcentaje de P recuperado en esta fracción, de 27,56% a 25,59% en B2 y de 20,53% a 18,62% en Cub (Figura 9). En el resto de los suelos el porcentaje de P recuperado fue menor a 11. Estos resultados evidencian que la incorporación del P soluble al PiLL es más lenta y en menor cantidad que la incorporación a la fracción PiML (Figuras 7 y 9). Resultados similares fueron reportados por Ochwoh *et al.* (2005a), en dos suelos ácidos incubados con P soluble.

Debido a que en suelos ácidos predomina el Fe y Al, es común la formación de compuestos del P con estos metales y por lo tanto el P proveniente del fertilizante incrementa más la fracción PiML en comparación que la PiLL (Ochwoh *et al.*, 2005b; Tsado *et al.*, 2012). Entre los suelos estudiados B2 presentó menor contenido de Fe y Al y mayor cantidad de Ca. Durante la incubación, en B2, aproximadamente el 25% del P soluble aplicado en forma de SFT perdió solubilidad al transformarse a Pi asociado al calcio (Figura 9).

Grupo 1



Grupo 2



Grupo 3

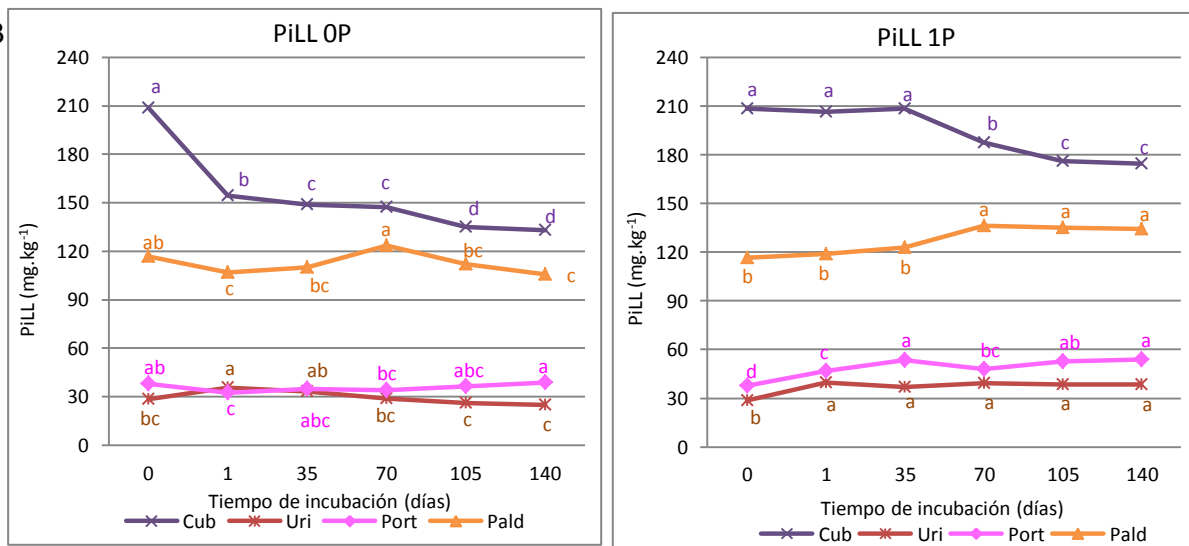
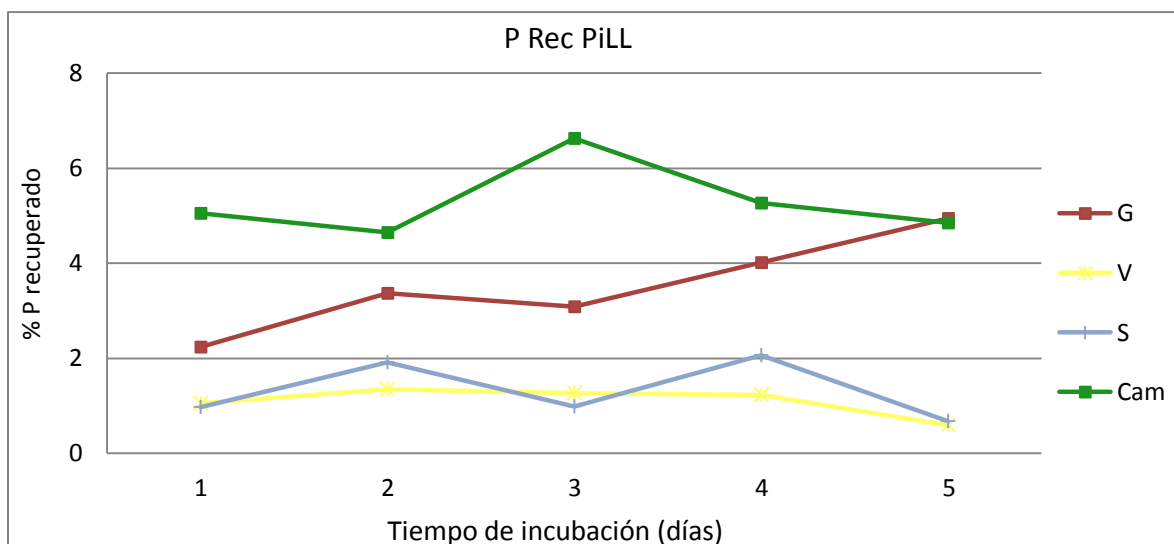
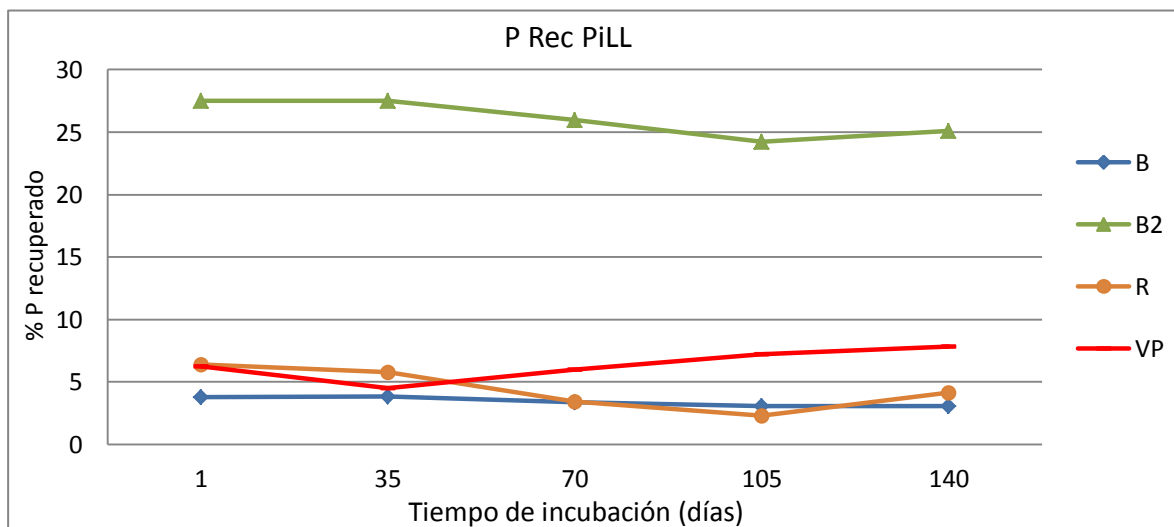


Figura 8. Cambios en PiLL en los tres grupos de suelos en diferentes tiempos de incubación. Letras iguales en la misma línea no son significativamente diferentes, según Tukey.

Grupo 1



Grupo 2



Grupo 3

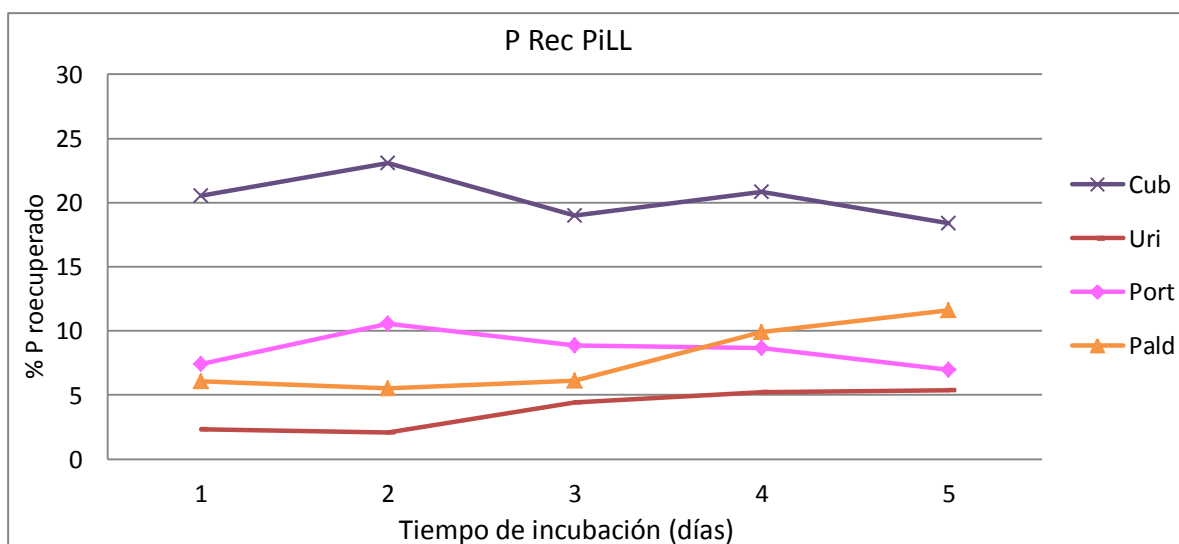


Figura 9. Porcentaje de P recuperado, en los tres grupos de suelos, por la fracción PiLL, en los diferentes tiempos de incubación.

PiO

Las fracciones de PiO de los suelos Cam, S, G, B2, R, VP y Port. no variaron significativamente durante la incubación, en el tratamiento 0P (Figura 10). En el tratamiento 1P se observó un incremento en los suelos G, VP y B2 mientras que los suelos Cam, S, R y Port no fueron afectados por el P aplicado.

El comportamiento del PiO en los suelos V, B, Pald, Cub y Uri, fue diferente. En las muestras incubadas sin P, los suelos B y Pald registraron aumentos del PiO, mientras que en V, Cub y Uri se produjo una disminución de dicha fracción. La aplicación de P no afectó el contenido de PiO en V y Uri mientras que en B y Pald provocó un aumento y en Cub una disminución (Figura 10).

El incremento del PiO registrado en los suelos G, VP, B2, B y Pald producto de la aplicación de P, coincide con los cambios señalados por Bauhler *et al.* (2002) en esta fracción en 7 días de incubación, utilizando ^{33}P . Mientras que la disminución de dicha fracción en los suelos Cub y Uri contradice la definición de P recalitrante (Tiessen y Moir, 1993).

En los doce suelos, el PiO es la fracción inorgánica en la que se acumuló menos P producto de la aplicación de fertilizante fosfatado (Figura 11). A excepción de VP donde el porcentaje de P recuperado varió de 9,91 a 14,45, en el resto de los suelos se recuperaron entre 0,03 a 6,52% del P (Figura 11). El comportamiento del PiO durante los 140 días de la incubación sugiere que la transformación del P aplicado en PiO requiere más tiempo.

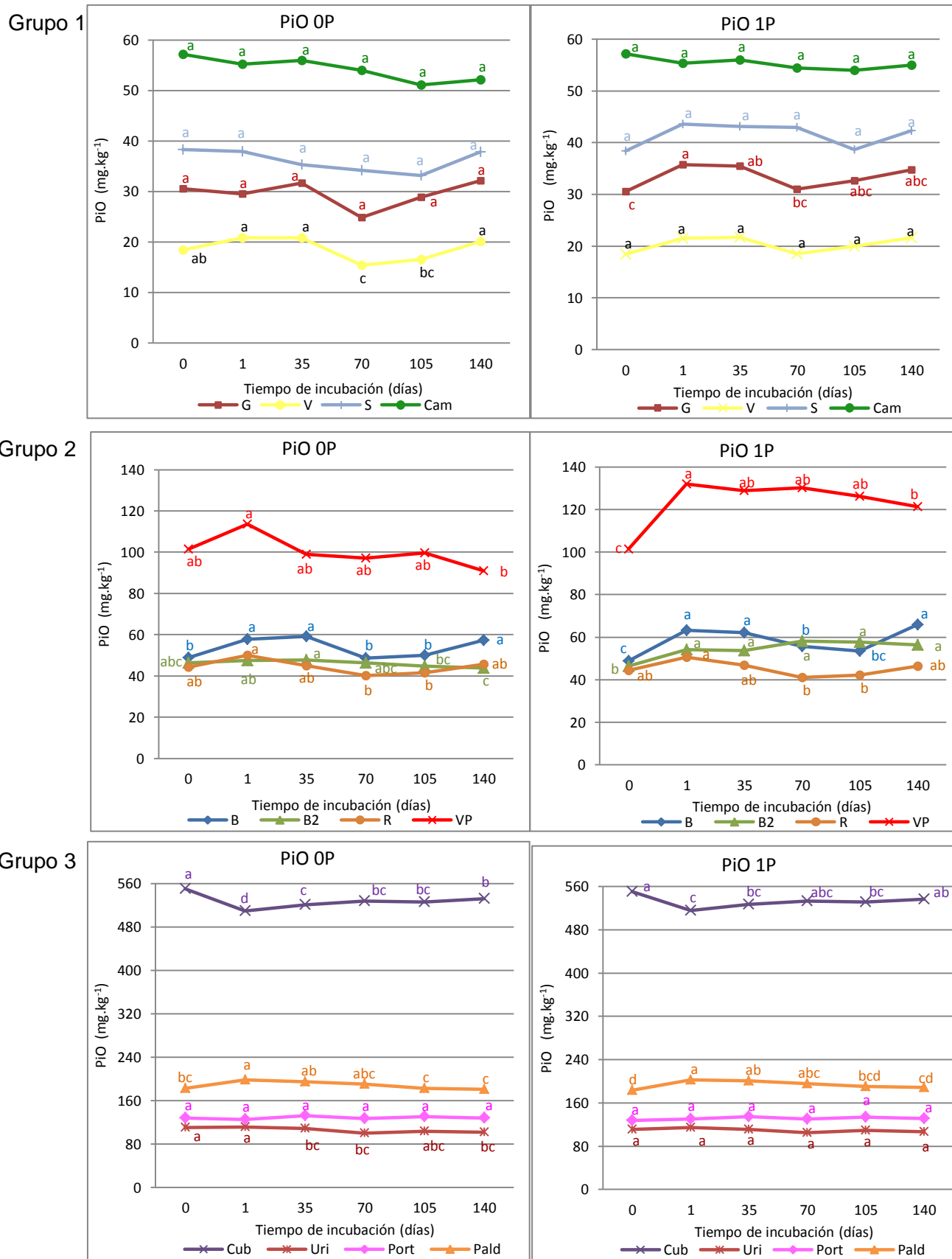
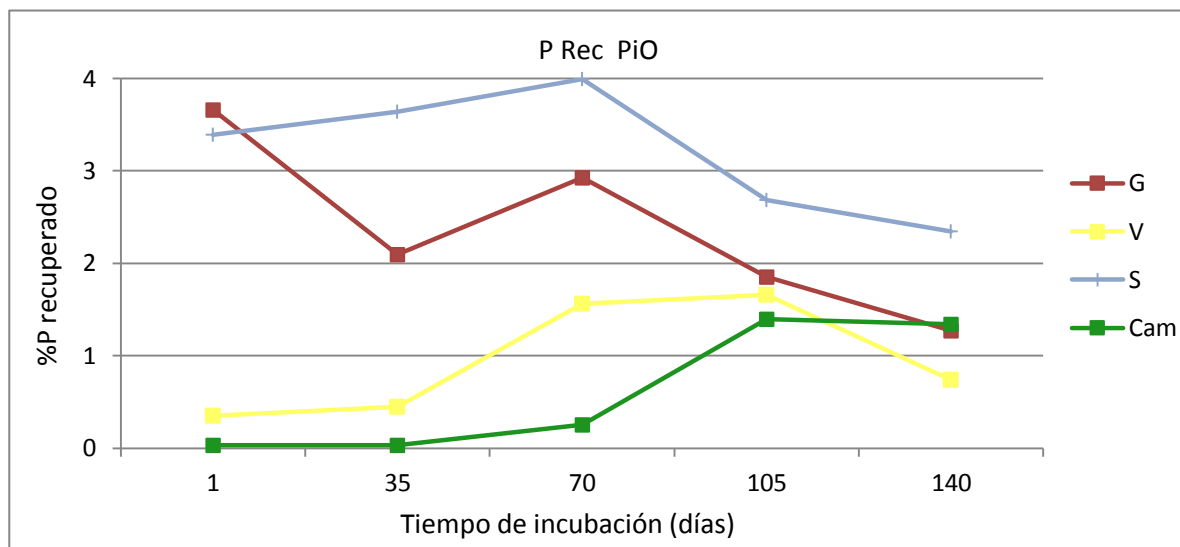
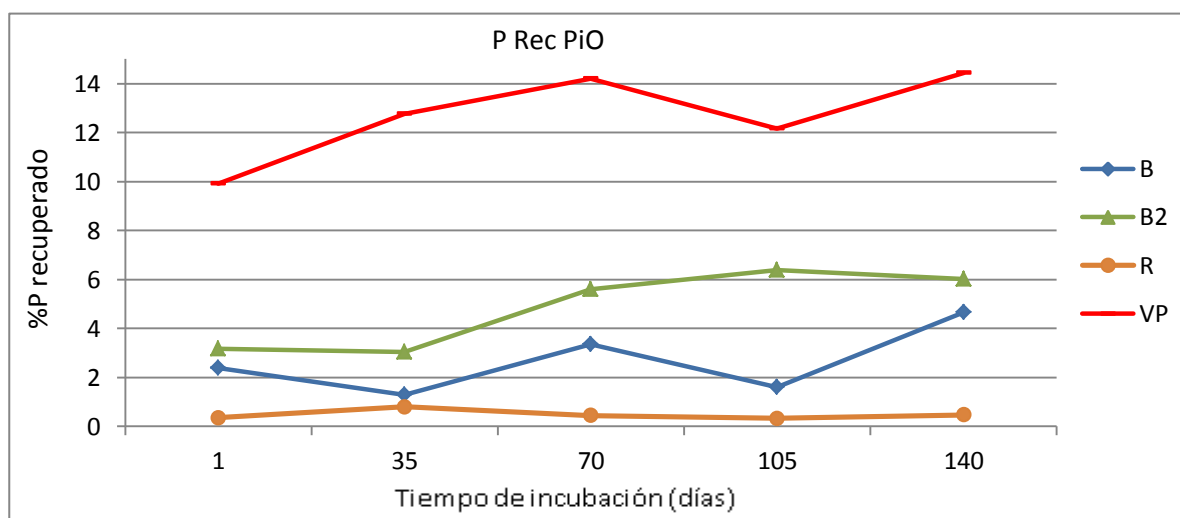


Figura 10. Cambios en PiO en los tres grupos de suelos, en diferentes tiempos de incubación. Letras iguales en la misma línea no son significativamente diferentes, según Tukey.

Grupo 1



Grupo 2



Grupo 3

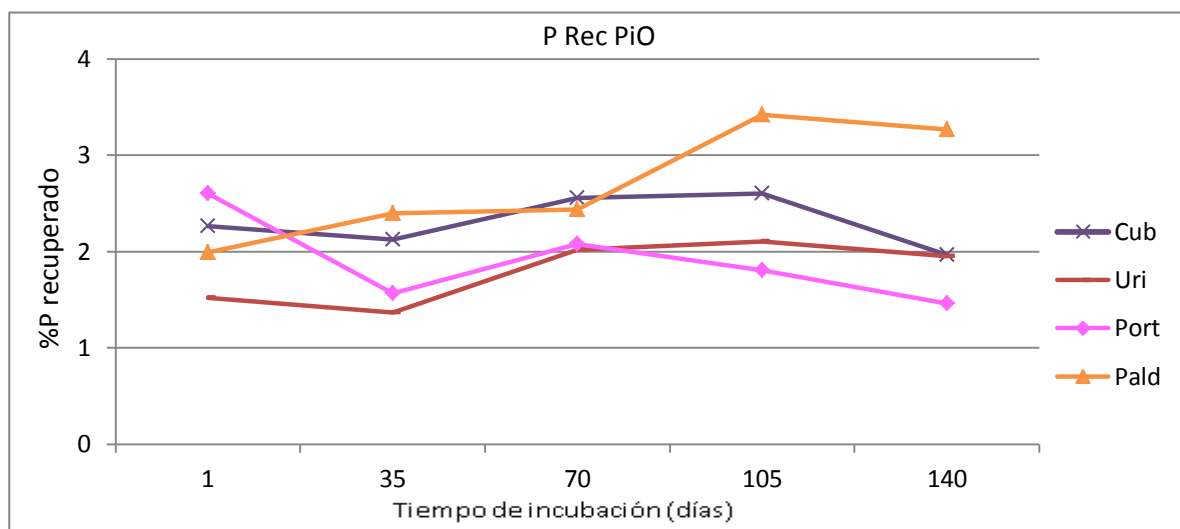


Figura 11. Porcentaje de P recuperado, en los tres grupos de suelos, por la fracción PiO, en los diferentes tiempos de incubación.

V.2.2 Fracciones de P orgánico

PoL

La incubación de los suelos, sin aplicación de P, produjo cambios en el PoL (Figura 12). En los suelos S, Cam, B, B2, Port y Pald, el PoL disminuyó, indicando una posible mineralización del Po (Beck y Sanchez, 1994). Dicha fracción lábil puede ser mineralizada en un corto periodo de tiempo, días o pocas semanas (Cross y Schlesinger, 1995; Linquist *et al.*, 1997). En V y Uri, hubo un incremento significativo del PoL, sugiriendo que parte del P presente en el suelo fue inmovilizado por los microorganismos. Al respecto, Fernández *et al.* (2006a), reportaron un incremento del PoL después de incubar un suelo ácido durante 25 días, sin aplicación de P, y lo atribuyeron a la inmovilización microbiana.

En los suelos G y VP, el contenido de PoL mostró una tendencia a disminuir y luego aumentar mientras que en R se encontró un aumento y disminución posterior. Meason *et al.* (2009) señalaron la importancia de las fluctuaciones del Po en suelo, sin aplicación de fertilizantes, para contribuir al Pi lábil. El suelo Cub fue el único que no mostró cambios en su contenido de PoL, por efecto de la incubación (Figura 12).

Varios investigadores (Hedley *et al.*, 1994; Linquist *et al.*, 1997 y Dobermann *et al.*, 2002) han concluido que la aplicación de fertilizante fosfatado tiene poco efecto sobre las fracciones de Po. Sin embargo, en este trabajo, a excepción del suelo Cub, la aplicación de P produjo un incremento significativo del PoL en todos los suelos (Figura 12). Hartono *et al.* (2000) también encontraron, en experimentos de incubación, un incremento en el PoL, producto de la aplicación de fertilizante fosfatado, y lo atribuyeron a una inmovilización del P por parte de los microorganismos. La acumulación de Po bajo fertilización inorgánica también ha sido reportada por Tiessen *et al.* (1992) y Zhang *et al.* (1994). Estos investigadores señalaron que esto ocurre siempre que el C orgánico no sea limitante, debido a que este es una importante fuente de energía para los microorganismos.

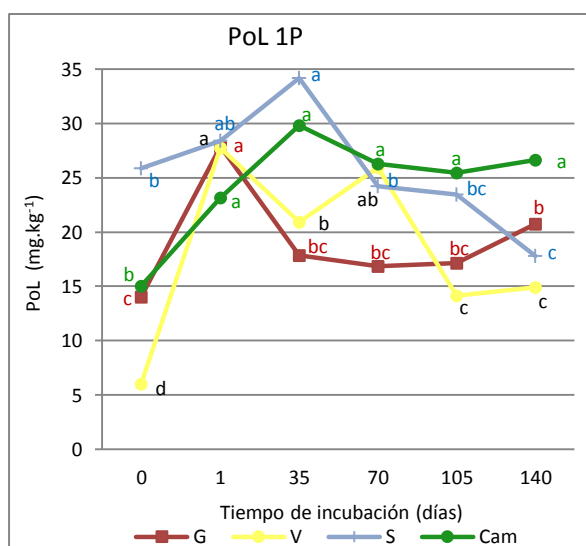
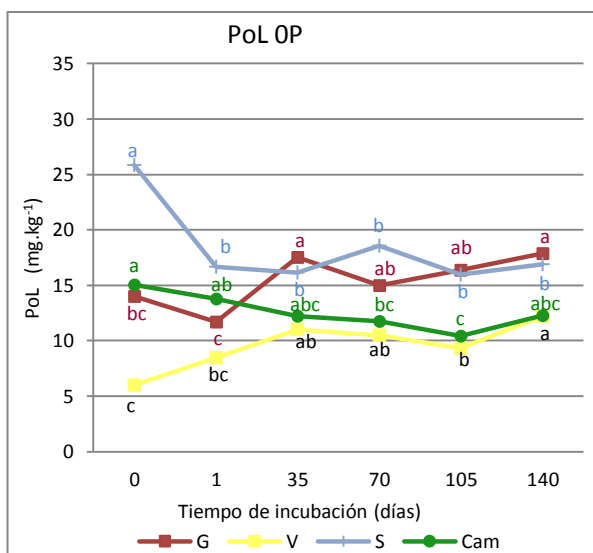
El incremento de PoL alcanzó un máximo el día 1 en los suelos G, V, R, Pald y Port y el día 35 en los suelos S, Cam, B y VP, para luego disminuir. En los suelos B2 y Uri el incremento continuó durante los 140 días de la incubación (Figura 12).

Generalmente los suelos con alto contenido de materia orgánica acumulan más P en la fracción PoL (Wang *et al.*, 2008). Entre los suelos estudiados, Cub tiene el mayor porcentaje de materia orgánica (Cuadro 3), sin embargo, la cantidad de PoL permaneció igual durante todo el periodo de incubación (Figura 12). A los 70 días, el PoL mostró una posible transformación por parte de los microorganismos, pero no fue significativa. Shi *et al.* (2013) también encontraron, en un suelo ácido con alto contenido de materia orgánica, que el P aplicado al suelo no se incorporó al PoL.

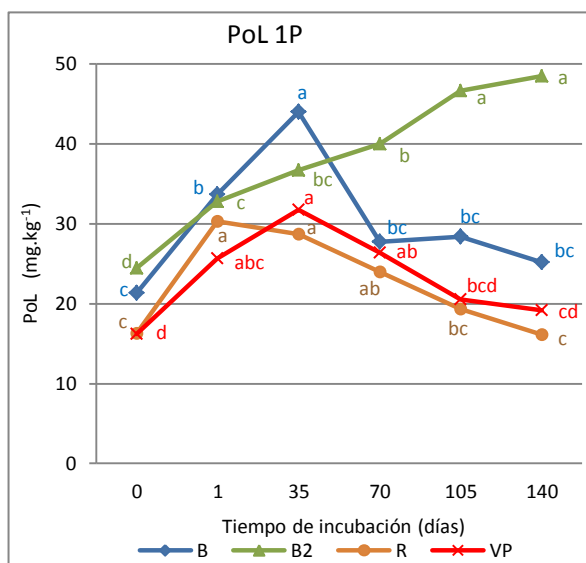
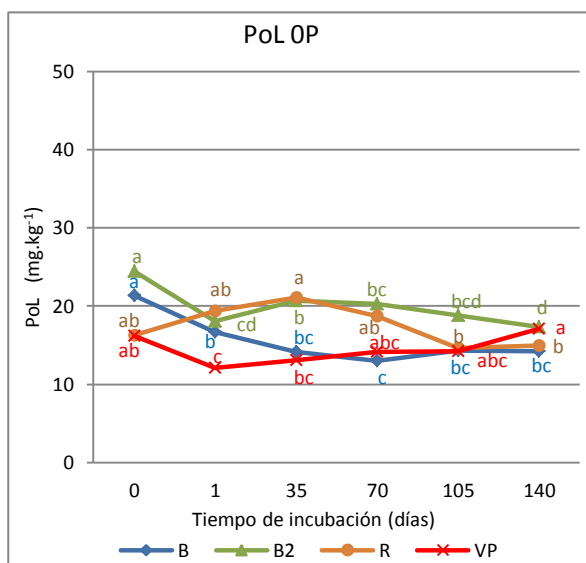
El P recuperado como PoL, a un día de la incubación, varió de 0,56% a 10,31%, el valor más bajo correspondió al suelo Cub, y el más alto a Pald (Figura 13). Transcurridos 35 días de la incubación, en los suelos, S, Cam, B, B2, VP y Uri aumentó la cantidad de P recuperado como PoL, en cambio en G, V, R, Pald, Port y Cub disminuyó, sugiriendo, por una parte, un aumento del P inmovilizado y por otra la mineralización del P. Posteriormente, en los suelos que mostraron incrementos se observó una disminución, del P recuperado en esta fracción orgánica, hasta el final de la incubación (Figura 13). B2 fue el único suelo que mostró un incremento del PoL durante todo el experimento.

Al final de la incubación, 140 días, el P recuperado en PoL fue mayor en el suelo B2, 15,21% (Figura 13). El porcentaje de P recuperado como PoL en el suelo Cub fue el menor, 0,37% durante los 140 días del experimento. El insignificante efecto de la aplicación de fertilizante fosfatado sobre PoL, observado en el suelo Cub, también fue reportado por Hartono *et al.* (2006) en un experimento de incubación de 90 días de duración, utilizando varios ultisoles.

Grupo 1



Grupo 2



Grupo 3

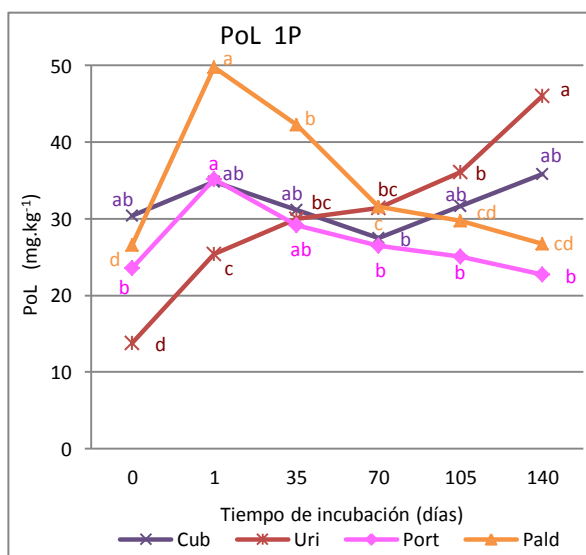
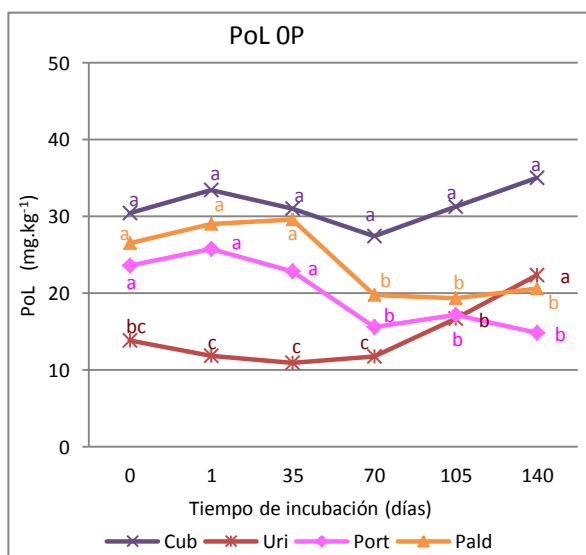


Figura 12. Cambios en el PoL en los tres grupos de suelos, en diferentes tiempos de incubación. Letras iguales en la misma línea no son significativamente diferentes, según Tukey.

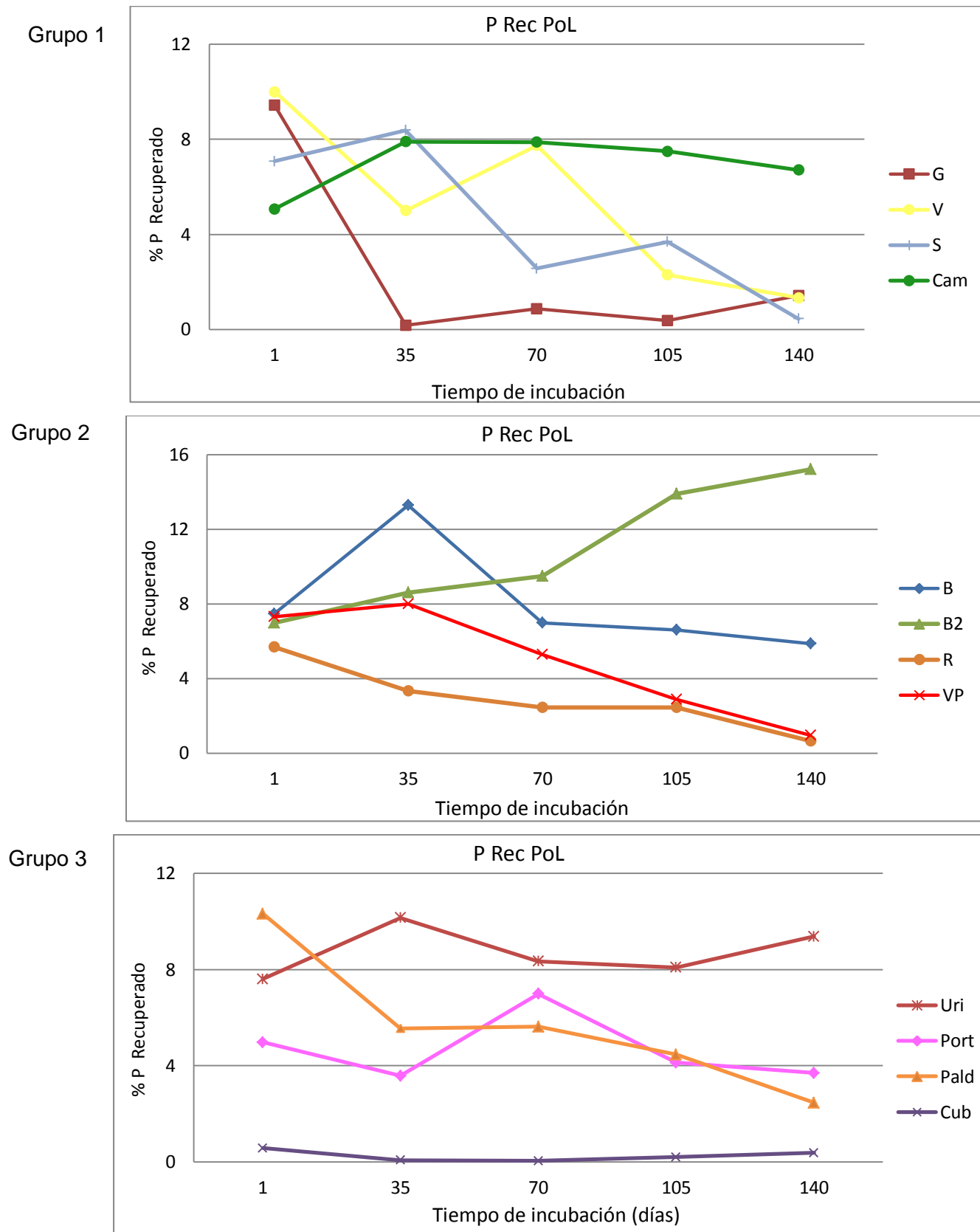


Figura 13. Porcentaje de P recuperado, en los tres grupos de suelos, por la fracción PoL, en los diferentes tiempos de incubación.

PoML

El PoML, está asociado a los ácidos húmicos y fúlvicos (Fernández *et al.*, 2006b), es la forma orgánica predominante en los suelos estudiados, siendo más alta, que PoL, PoLL y PoO (Cuadros 4 y 5). Resultados similares fueron encontrados por Araújo *et al.* (2004) quienes encontraron que el PoML fue la fracción orgánica más grande en dos suelos ácidos y explicaron que el alto contenido de PoML estaba relacionado con la cantidad de materia orgánica del suelo.

El PoML es una forma estable, protegida del ataque microbiano por la adsorción a las partículas de arcilla (Van Getsel *et al.*, 1991), sin embargo, durante la incubación sin P, hubo una disminución de esta fracción en los suelos Cam, S, VP, R, B, Cub y Uri (Figura 14), lo que sugiere una mineralización del Po en los 140 días del experimento. Beck y Sanchez (1994) señalaron que el PoML puede representar una fuente de P disponible para la planta, en suelos tropicales, que no reciben fertilizante fosfatado.

En los suelos G y Pald, con OP, el PoML mostró un incremento en el primer día de incubación y luego comenzó a disminuir hasta el final de esta (Figura 14). En los suelos V, B2 y Port el PoML, permaneció igual durante todo el tiempo de incubación.

La aplicación de P soluble produjo un incremento en el PoML de los suelos G, B2, Pald y Port (Figura 14). Hartono *et al.* (2006) explicaron en un experimento de corta duración que el incremento del PoML podría ser el resultado de la incorporación del P aplicado a la biomasa microbiana. En los suelos Cam, VP, R, B y Uri el PoML disminuyó, mientras que en S, V y Cub permaneció estadísticamente igual durante todo el tiempo de incubación, al respecto, Lozano *et al.* (2012) encontraron una disminución del Po extraído con NaOH en un suelo ácido fertilizado con P y Rivaie *et al.* (2008) mencionaron que la aplicación de superfosfato triple a dos suelos ácidos no incrementó el Po extraído con NaOH (PoML).

El P recuperado en la fracción PoML el primer día de la incubación varió de 0,37 a 11,83% (Figura 15). Transcurridos 140 días de la incubación el P recuperado varió de 0,45 a 14,29%. Buehler *et al.* (2002) encontraron que 14% del P aplicado fue

recuperado en PoML después de dos semanas de incorporado al suelo. Las cantidades de P soluble incorporados a la fracción PoML fueron similares a las incorporadas a PoL.

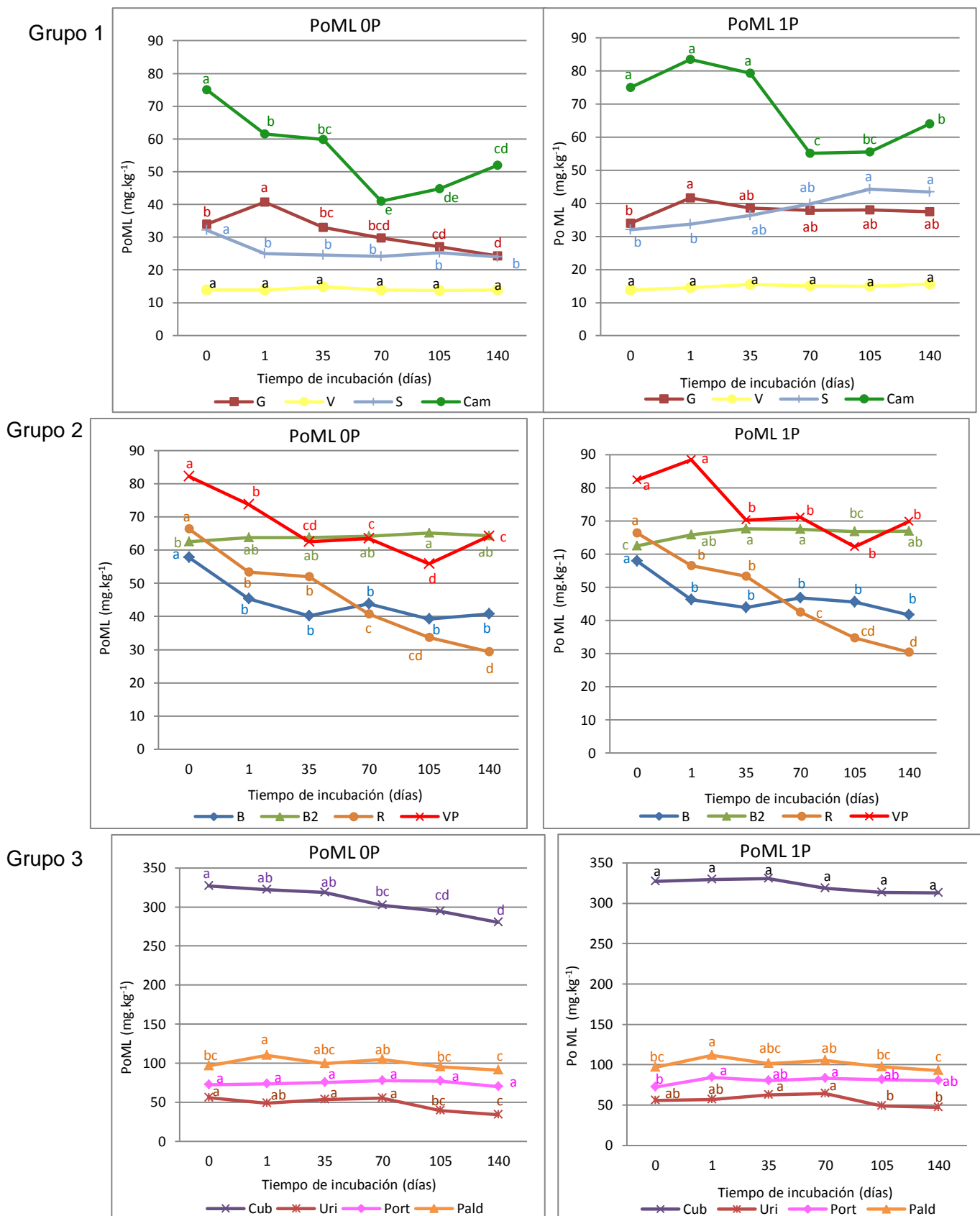


Figura 14. Cambios en PoML en los suelos, en diferentes tiempos de incubación, sin aplicación de P (0P) y con aplicación de P (1P). Letras iguales en la misma línea no son significativamente diferentes, según Tukey.

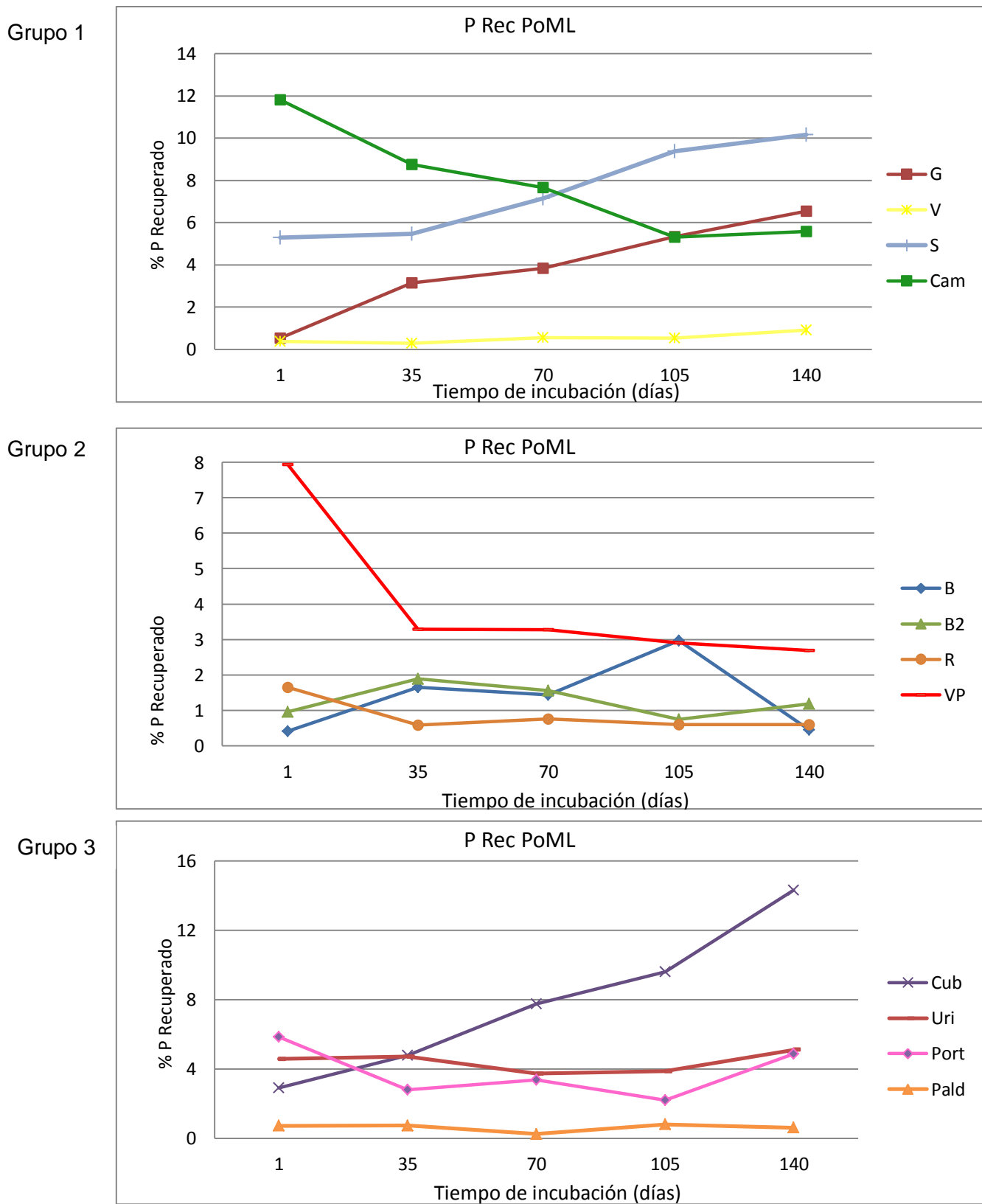


Figura 15. Porcentaje de P recuperado, en los tres grupos de suelos, por la fracción PoML, en los diferentes tiempos de incubación.

PoLL

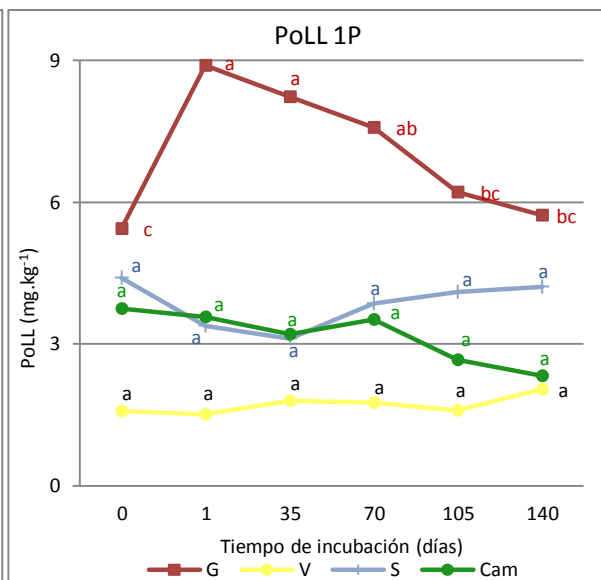
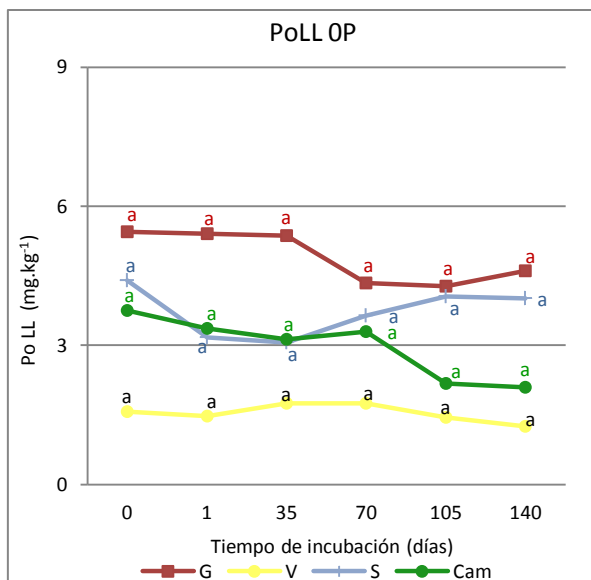
Las cantidades de PoLL, son las más pequeñas de todas las fracciones orgánicas y variaron desde $1,42 \text{ mg.kg}^{-1}$ en el suelo Pald hasta $6,72 \text{ mg.kg}^{-1}$ en el suelo Uri, al comienzo de la incubación (Figura 16). En el transcurso de la incubación, en OP, el contenido de PoLL en siete suelos, permaneció estadísticamente igual. Solo se observó aumento de esta fracción en los suelos B2 y Pald y disminución en los suelos B, VP y Uri.

La mayoría de los trabajos sobre fraccionamiento de P no incluyen el PoLL, sin embargo, He *et al.* (2006) demostraron que el HCl 1M también extrae Po y lo definieron como Po hidrolizable unido al calcio. Linqvist y Ruark (2011), encontraron que esta fracción varió entre 0 y 128 mg.kg^{-1} y concluyeron que el PoLL puede ser importante para la nutrición de las plantas.

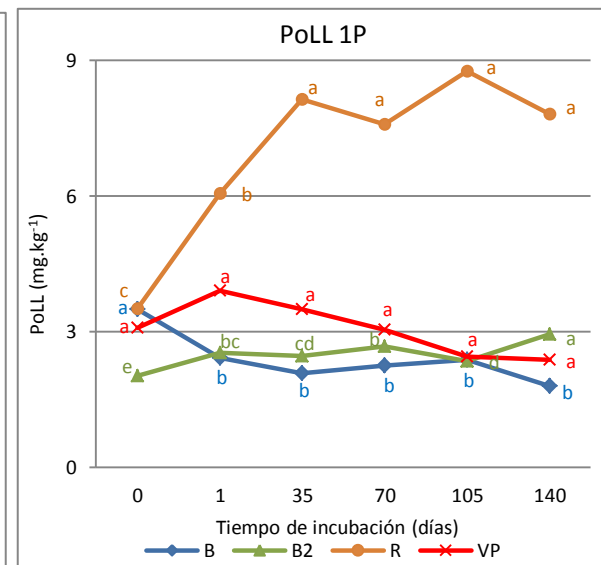
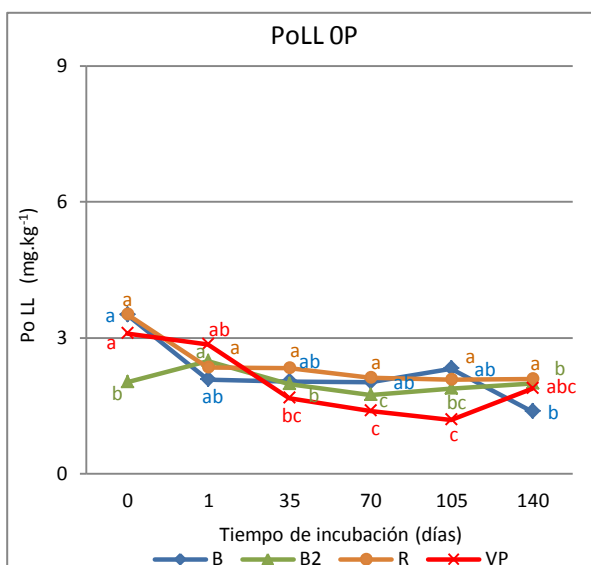
La incubación de los suelos con P, produjo un incremento del Po extraído con HCl en los suelos G, B2, R, Cub y Pald (Figura 16), mientras que en B disminuyó. Por el contrario, la fertilización fosfatada no afectó la fracción PoLL en los suelos, V, S, Cam, VP, Uri y Port. La incorporación de P al PoLL en los suelos con mayor cantidad de calcio, G, B2, R, Cub y Pald (Cuadro 3) confirma la relación de dicha fracción con el calcio.

Una parte, 0,02 a 4,12%, del P soluble aplicado al suelo, fue recuperado en PoLL (Figura 17). Durante todo el experimento los suelos Cub, R y Pald mostraron la mayor cantidad de P recuperada como PoLL.

Grupo 1



Grupo 2



Grupo 3

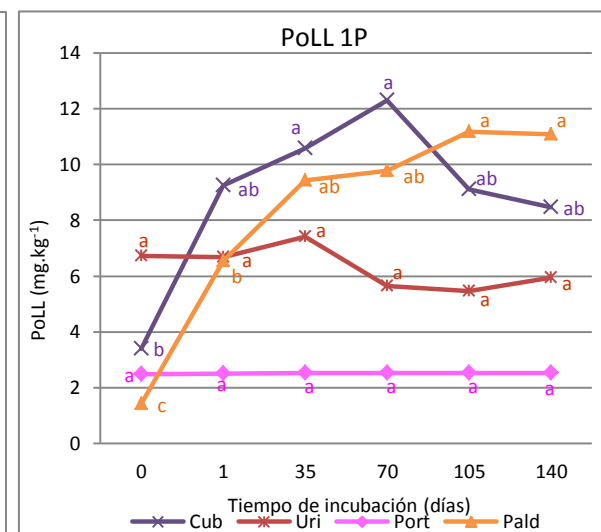
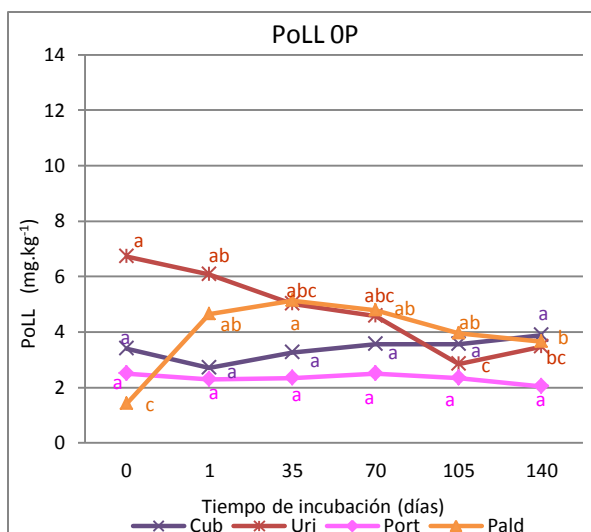
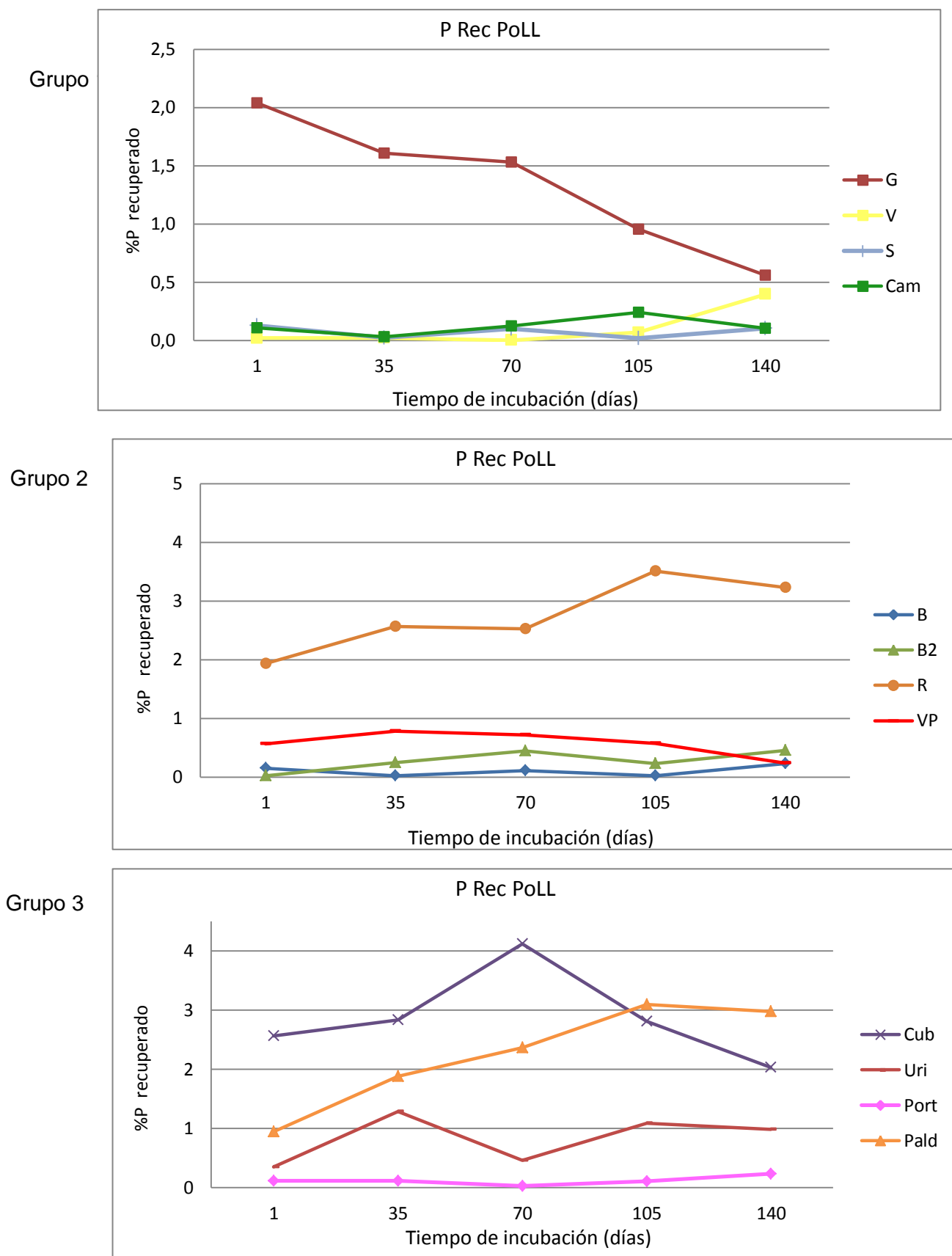


Figura 16. Cambios en PoLL, en tres grupos de suelos en diferentes tiempos de incubación, sin aplicación de P (0P) y con aplicación de P (1P). Letras iguales en la misma línea no son significativamente diferentes, según Tukey.



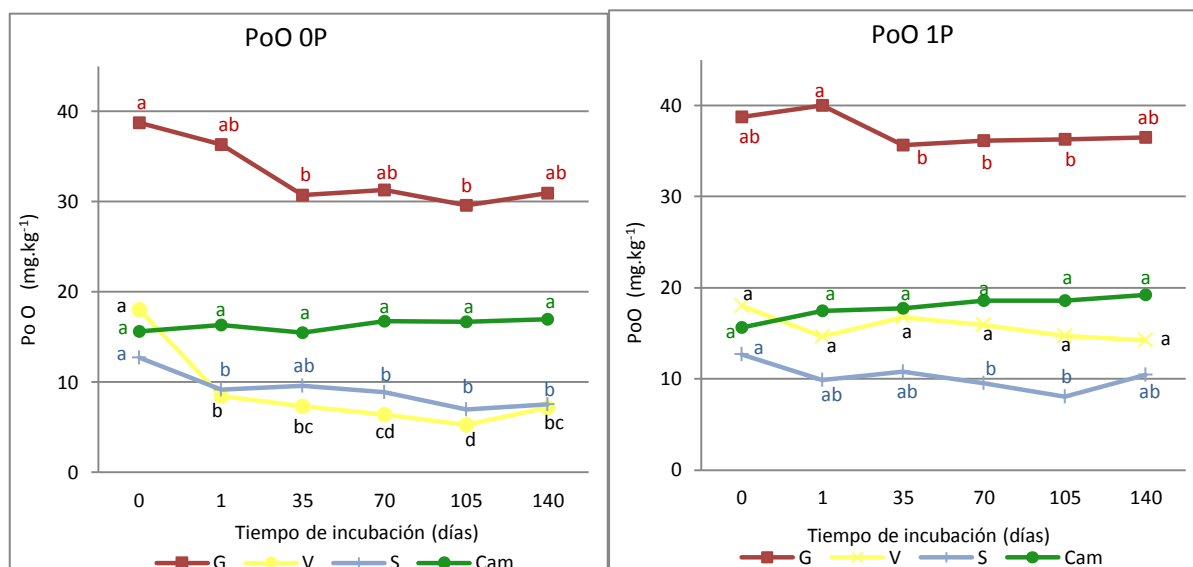
PoO

En los suelos Cam, B, B2 y Port, el proceso de incubación, sin P y con P, no afectó la fracción PoO, permaneciendo estadísticamente igual durante los 140 días (Figura 18). El Po extraído con HCl concentrado (PoO) es ocluido y corresponde a fracciones de P unidas a ácidos húmicos y huminas, los cuales son muy estables, difícil de ser modificados por microorganismos y por lo tanto, poco sensible a pérdidas con el tiempo (Ochwoh *et al.*, 2005a). Esta descripción coincide con el comportamiento del PoO en los suelos mencionados. Sin embargo, esto no ocurrió en el resto de los suelos, donde si hubo cambios en la fracción PoO durante el experimento.

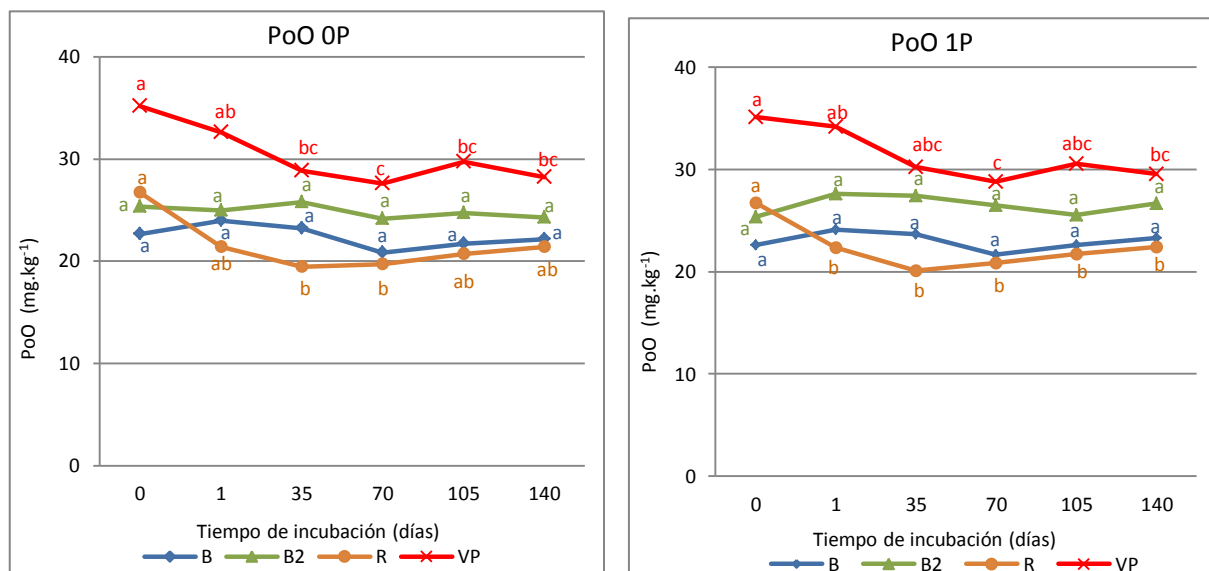
En el caso de los suelos, G, V, S, VP, R, Pald y Uri el PoO mostró una disminución tanto en 0P como en 1P (Figura 18), lo que parece indicar la mineralización de una porción de esta fracción orgánica. Mientras que en el suelo Cub hubo un incremento, lo que indicaría una inmovilización del P del suelo en 0P y que parte del P aplicado se acumuló en esta fracción, en el suelo fertilizado. Resultados similares fueron encontrados por Ochwoh *et al.* (2005a), quienes señalaron que una parte del P aplicado al suelo fue incluido a la fracción PoO. Buehler *et al.* (2002) encontraron que más del 14% del ^{33}P fue recuperado en las fracciones orgánicas que incluían el PoO, dos semanas después de la incubación.

El P recuperado en esta fracción orgánica representó un pequeño porcentaje del P aplicado y varió de 0,06 a 4,79% (Figura 19). Los suelos V y G fueron los que acumularon, en forma de PoO, la mayor cantidad del P aplicado, los valores encontrados fueron mayores a 2% durante todo el experimento.

Grupo 1



Grupo 2



Grupo 3

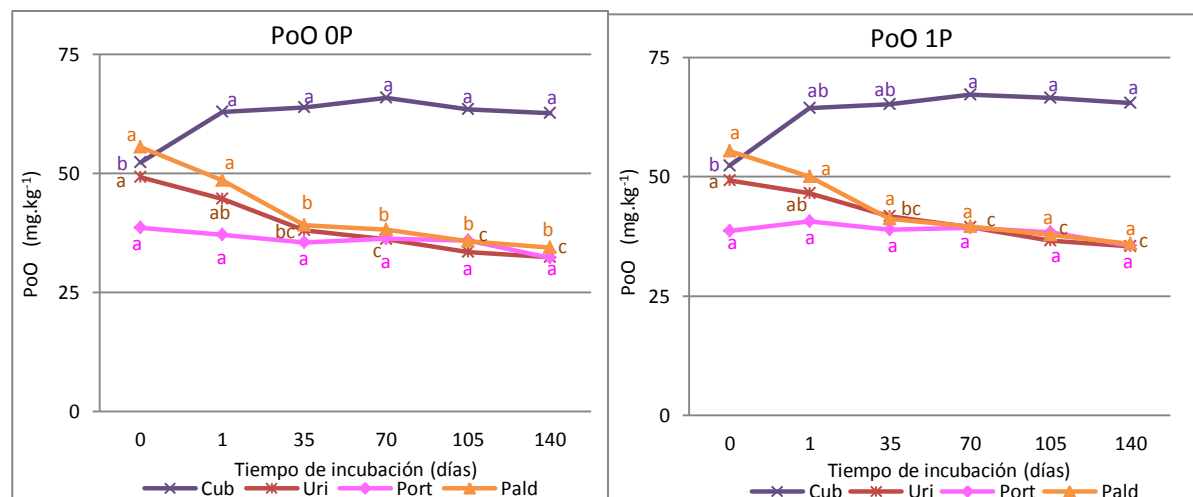
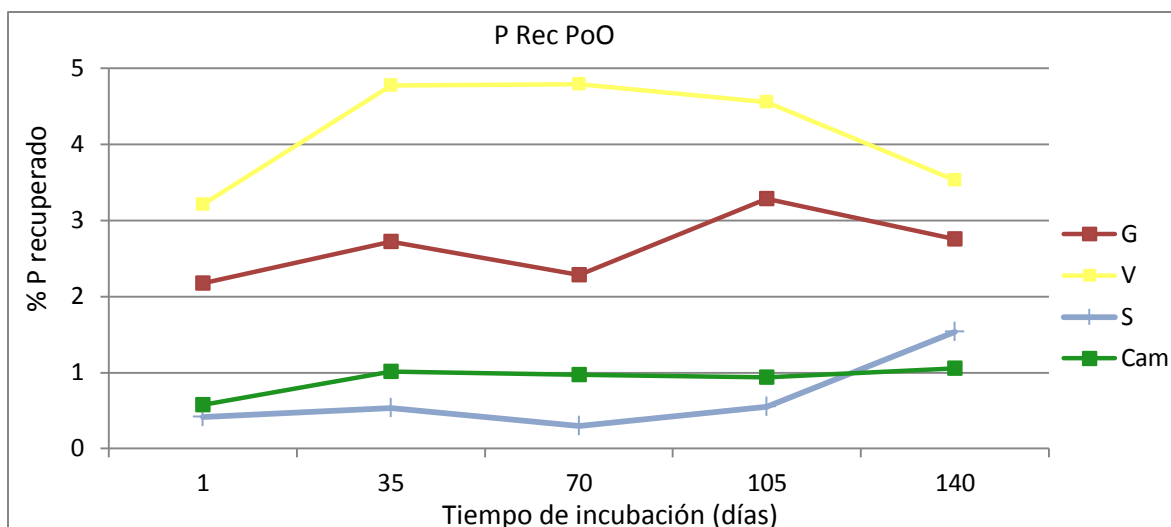
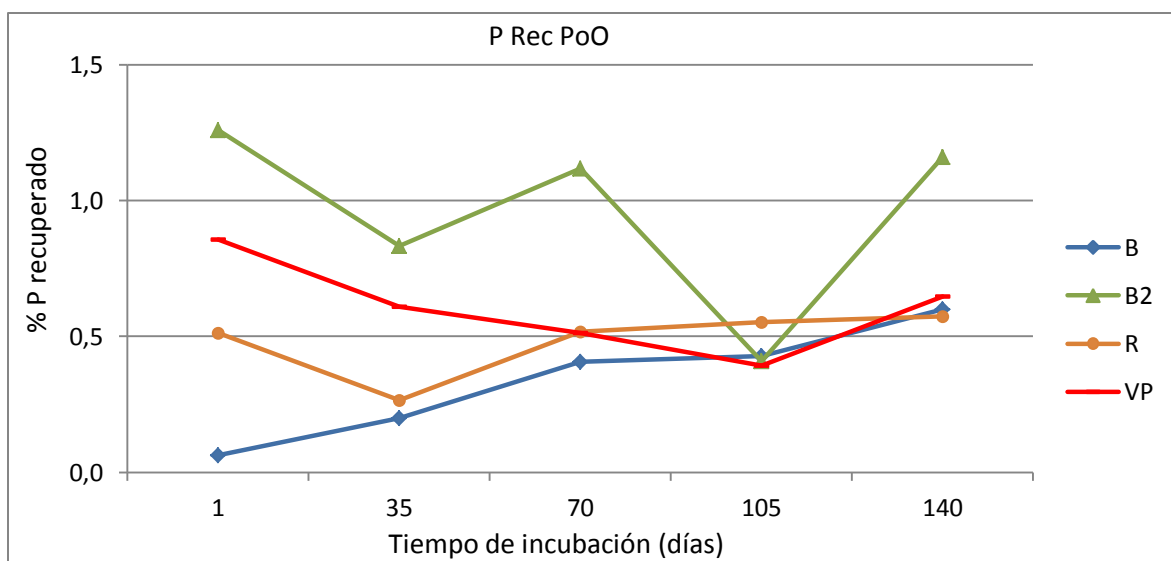


Figura 18. Cambios en el PoO, en los tres grupos de suelos en diferentes tiempos de incubación, sin aplicación de P (0P) y con aplicación de P (1P). Letras iguales en la misma línea no son significativamente diferentes, según Tukey.

Grupo 1



Grupo 2



Grupo 3

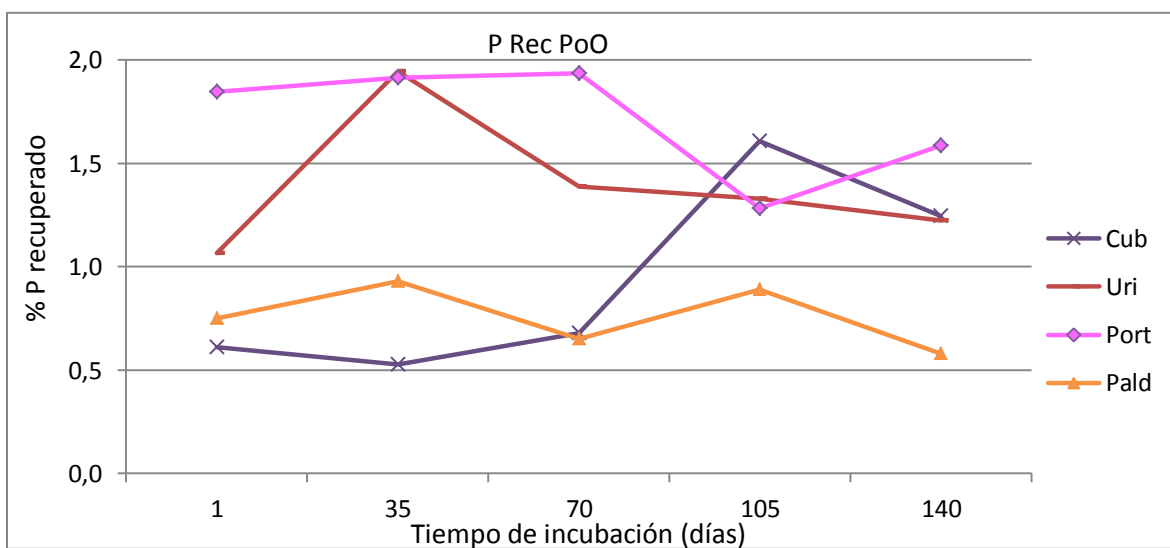


Figura 19. Porcentaje de P recuperado, en los tres grupos de suelos, por la fracción PoO en los diferentes tiempos de incubación.

V.2.3 Fracción Residual

P Residual (PRC)

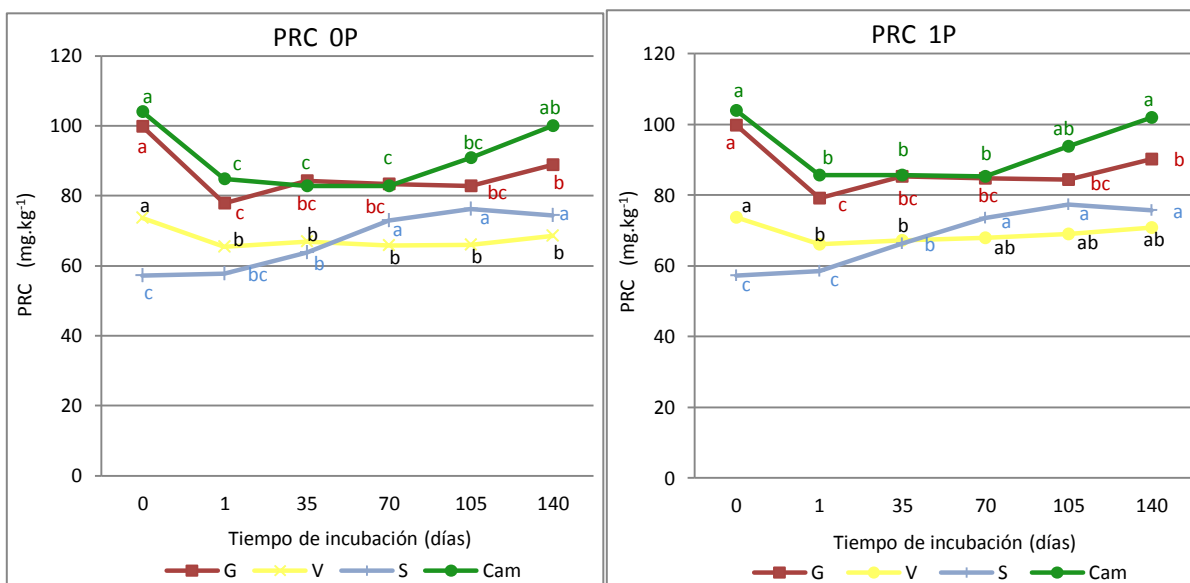
El P extraído con H_2SO_4 concentrado se mantuvo estable durante todo el tiempo de incubación para los suelos B2 y R, bajo los dos tratamientos de fertilización (Figura 20). Resultados similares fueron obtenidos por Neufeldt *et al.* (2000) y Henríquez y Killorn (2005) quienes concluyeron que la fracción PRC es muy estable y por lo tanto, la aplicación de fertilizante no produce cambios en la misma, en cortos periodos de tiempo. Dicha fracción incluye la apatita y otros fosfatos de Ca recalcitrantes y puede contener P_i y P_o (Araújo *et al.*, 2004).

El resto de los suelos, incubados sin y con P, mostraron variación en el contenido de PRC (Figura 20). Los cambios ocurridos durante la incubación sugieren que esta fracción puede ser modificada en cortos periodos de tiempo. En los suelos G, V, Pald y B hubo una disminución del PRC. Por otra parte, en los suelos Cam, VP, Port, Uri y Cub el contenido de PRC, disminuyó y luego aumentó, mientras que S fue el único suelo que mostró un aumento de esta fracción residual, durante todo el experimento. Los resultados obtenidos por Ochwoh *et al.* (2005a) también mostraron un aumento del PRC, en 240 días de incubación del suelo con P y Hedley *et al.* (1982) en 21 días de incubación sin aplicación de P.

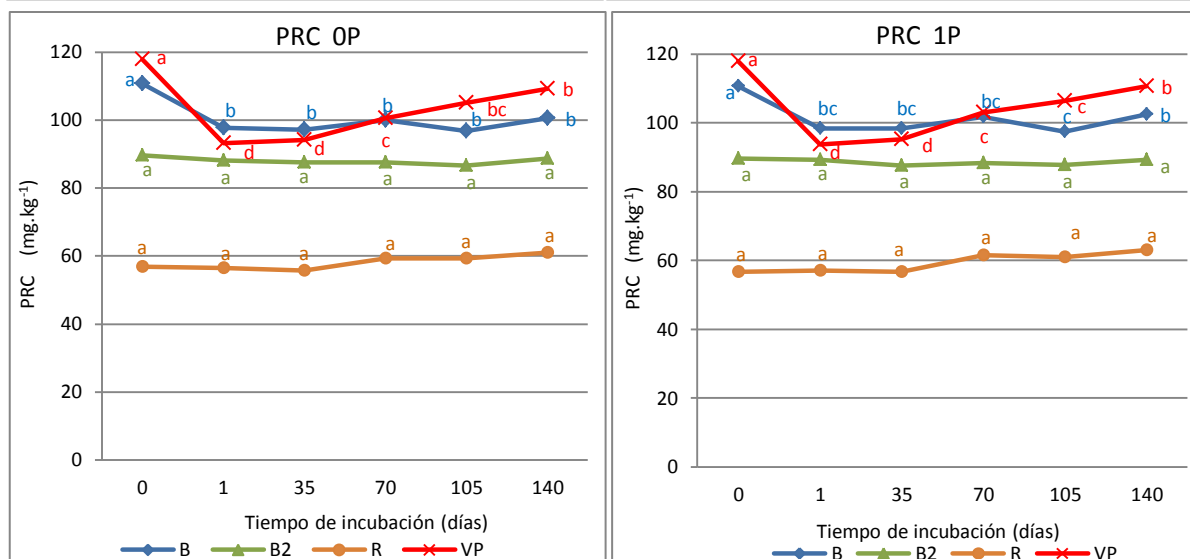
Por su parte Ojo *et al.* (2014) reportaron un aumento significativo del P residual dos semanas después de la incubación del suelo con P soluble, y luego del aumento inicial, dicha fracción comenzó a disminuir lo que significó, según los investigadores, la liberación de P de la fracción no lábil a la fracción lábil.

El P recuperado en la fracción residual fue muy bajo en todos los suelos y varió de 0,08 a 1,56% (Figura 21). Lo que sugiere que 140 días no son suficientes para que una parte significativa del P soluble, aplicado a los suelos estudiados, se incorpore a esta fracción. Al respecto, Linqvist *et al.* (1997) encontraron que aproximadamente 37% del P aplicado en el fertilizante fue recuperado en la fracción recalcitrante que incluye al PRC, 3,5 meses después de la aplicación.

Grupo 1



Grupo 2



Grupo 3

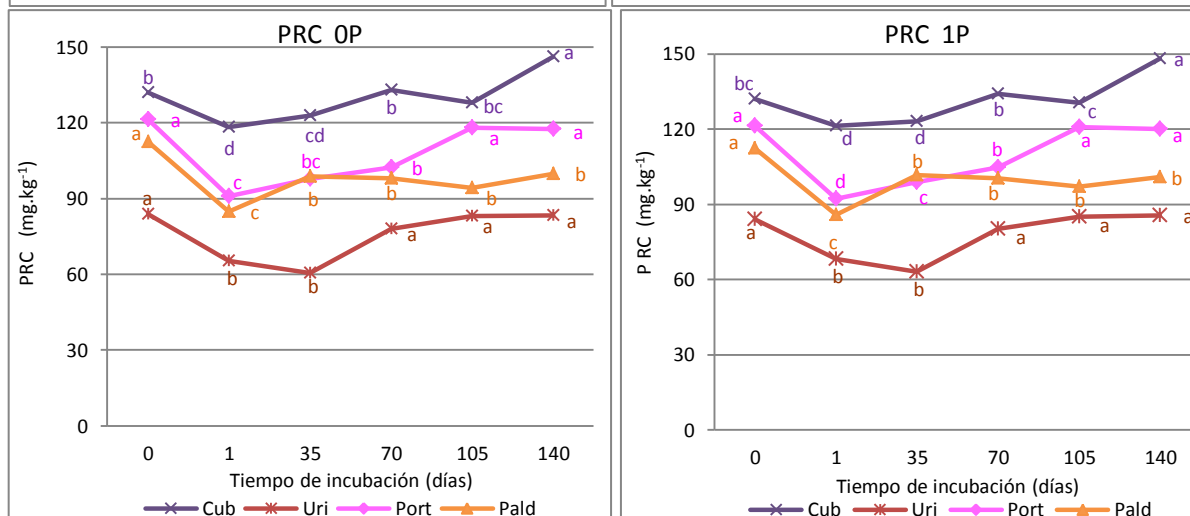
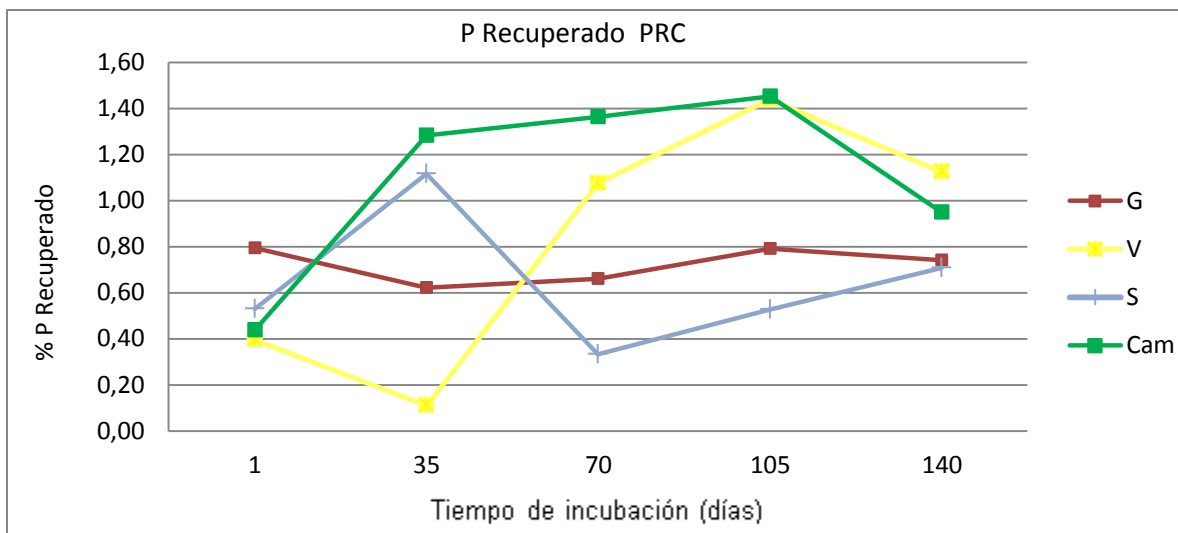
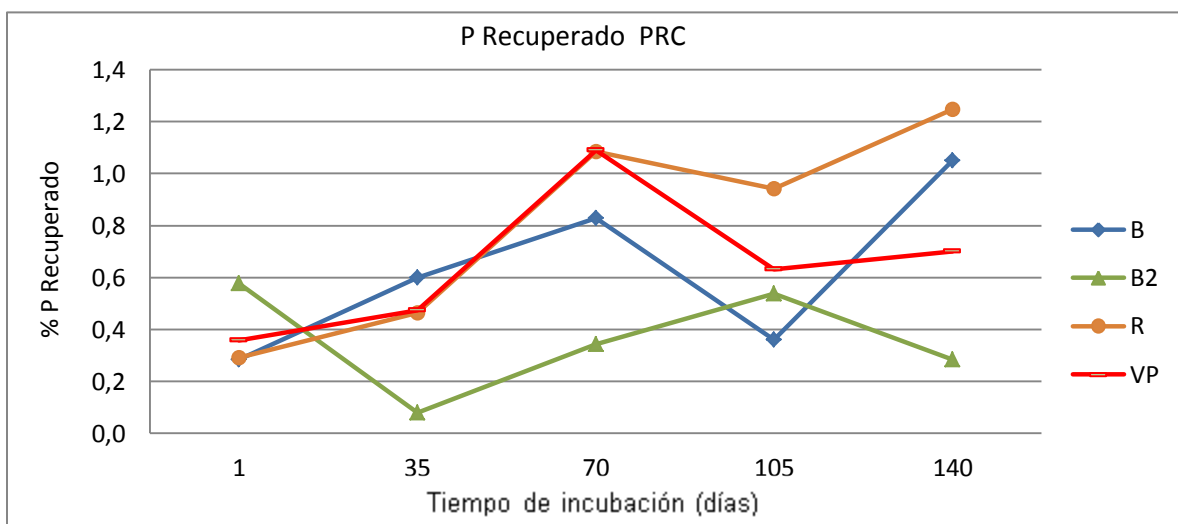


Figura 20. Cambios en el PRC en los tres grupos de suelos, en diferentes tiempos de incubación, sin aplicación de P (0P) y con aplicación de P (1P). Letras iguales en la misma línea no son significativamente diferentes, según Tukey.

Grupo 1



Grupo 2



Grupo 3

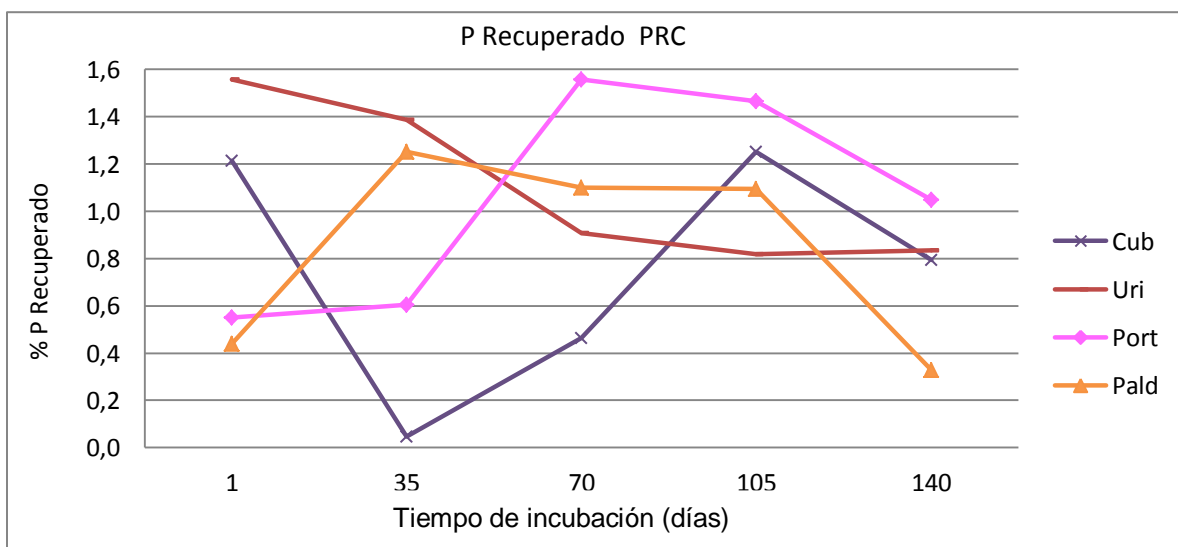


Figura 21. Porcentaje de P recuperado, en los tres grupos de suelos, por la fracción PRC, en los diferentes tiempos de incubación.

V. 3. Fracciones de fósforo y su relación con las propiedades del suelo

El grado de relación entre las fracciones de P y las propiedades de los suelos se estableció por medio de los coeficientes de correlación que se muestran en el cuadro 6. El PiR correlacionó negativamente con el Al, Fe y la Máxima Capacidad de Adsorción (MCA) y en forma positiva con el Ca y el pH. Según Malik *et al.* (2014) los suelos con mayor capacidad de adsorción acumulan menos P en la fracción resina. El P puede formar compuestos con Fe y Al (Onweremadu y Ofoh, 2007) y disminuir la cantidad de P extraída por la resina de intercambio aniónico, lo que explica la correlación negativa del PiR con Al y Fe.

Aunque el P puede formar compuestos de menor solubilidad con el calcio, en los suelos estudiados el contenido de Ca no disminuyó el PiR ($r= 0,48^{**}$). Los suelos con pH mayor acumularon mayor cantidad de P en la fracción PiR ($r= 0,70$) y esto puede estar relacionado con una menor cantidad de Fe, Al presente en los suelos con pH más alto (Cuadro 3).

Cuadro 6. Coeficientes de correlación de Pearson (r) entre las fracciones de P y las propiedades de los suelos.

	Arcilla	Al	Fe	Ca	MO	pH	MCA
PiR*		-0,59**	-0,50**	0,48**		0,70**	-0,55*
PiL		-0,36*				0,43*	-0,56*
PiML			0,59**		0,66**		
PiLL		-0,43**		0,67**	0,76**	0,48**	0,35*
PiO					0,72**		0,41*
PoL				0,38*	0,61**		0,48*
PoML	0,42*				0,80**		0,66**
PoLL					-0,45*		-0,50**
PoO			-0,43*		0,55**		
PRC	0,55**				0,55**		0,64**

MO: Materia orgánica, MCA: Máxima capacidad de adsorción de P, *: $P<0,05$, **: $P<0,01$.

Al igual que PiR, el PiL correlacionó negativamente con la MCA, lo que ratifica la relación de estas dos fracciones con la capacidad que tienen los suelos de adsorber P (Cuadro 6). Hartono *et al.* (2006) mencionaron que a mayor contenido de óxidos de Fe y Al en los suelos menor es la cantidad de PiL. En este estudio, la acumulación de P en esta fracción solo se relacionó con el Al ($r = -0,36$). El PiL puede ser liberado con mayor facilidad cuando el pH del suelo es más alto (Chang y Jackson, 1957; Tiessen y Moir, 1993) lo que explica la relación positiva de esta fracción con el pH del suelo ($0,43^*$) (Cuadro 6).

El hidróxido de sodio remueve el P que está unido a la superficie de los compuestos de Fe y Al (Boschetti *et al.*, 2003); en los suelos estudiados el PiML correlacionó solo con el Fe ($r = 0,59^{**}$) (Cuadro 6). La MO también mostró relación con el PiML ($r = 0,66^{**}$).

El PiLL fue correlacionado negativamente con el contenido de Al y positivamente con el contenido de Ca, MO, pH y la MCA (Cuadro 6). La relación del PiLL con el Ca puede indicar que el Pi extraído por el HCl diluido proviene de compuestos de Ca (Shaheen *et al.*, 2007) y confirma la interpretación de PiLL como fracción asociada al Ca (Tiessen y Moir, 1993). Los fosfatos de Ca son más estables e insolubles cuando el pH es más alto, esto explica la correlación significativa ($r = 0,48^{**}$) entre el PiLL y el pH. La correlación negativa de esta última fracción con el Al ($r = -0,43^{**}$) parece indicar que en suelos donde predomina el Al la formación de compuestos de P con Ca es menor. En cuanto a la relación del PiLL con la MO y la MCA, Giuffré *et al.* (1986) y Chand *et al.* (1995) coincidieron en que la materia orgánica puede retener cantidades significativas de P y que es probable que el P se combine directamente con cationes Fe, Al y Ca asociados a la MO.

El PiO correlacionó positivamente con el contenido de MO y MCA, lo que indica que las formas recalcitrantes de esta fracción están ligadas a la materia orgánica y aumentan cuando la capacidad del suelo de adsorber P es mayor (Cuadro 6).

En general, los suelos que tienen mayor contenido de materia orgánica tienen altos contenidos de P en la fracción PoL (Malik *et al.*, 2014). Lo que se evidencia en

este trabajo dado que la relación entre el PoL y la MO fue significativa y positiva, 0,61** (Cuadro 6).

El PoML mostró correlaciones positivas con Arcilla, MO y la MCA. La importancia de la materia orgánica en la acumulación de P en la fracción PoML ha sido señalada por Tyler (2002) y Xavier *et al.* (2011), los resultados de este trabajo confirman esta relación con un coeficiente de correlación alto y positivo (0,80**). El Po tiende a ser adsorbido en las arcillas por lo que se podría esperar mayores contenidos de Po en suelos con mayor contenido de arcilla (O'Halloran, 1993). En este estudio esta relación ocurrió solo con el PoML ($r = 0,42^*$).

PoLL fue la única fracción orgánica que presentó correlación negativa con la MO y la MCA (Cuadro 6).

El contenido de MO de los suelos estudiados también está relacionada con el PoO. Por otra parte, Malik *et al.* (2014) explicaron que el PoO es ocluido en minerales de Fe, lo que explica la correlación de dicha fracción con el contenido de Fe.

El P residual (PRC) correlacionó significativamente con la arcilla, MO y MCA (Cuadro 6). Wang *et al.* (2008) también encontraron una correlación positiva entre el P residual y el contenido de arcilla de los suelos. Al respecto, Gatiboni *et al.* (2007) mencionaron que en suelos con alto contenido de arcilla gran parte del P se encuentra en formas ligadas con alta energía (PRC) a los coloides. En cuanto a la relación de la fracción PCR con la MO del suelo, 0,55**, Araújo *et al.* (2004) explicaron que dicha fracción puede contener Pi y Po. El contenido de arcilla y de MO de los suelos son dos de los factores que determinan la capacidad de adsorción de P, de allí la correlación del PRC con la MCA.

V.4. Cambios de las fracciones de fósforo en el suelo debidas al desarrollo del maíz.

V.4.1 Producción de materia seca

La respuesta de la materia seca (MS) del maíz a la aplicación de fósforo al suelo e incubado por 140 días, fue significativa en todos los suelos estudiados (Cuadro 7), a excepción de Cub donde no se encontró incremento significativo. La magnitud de la respuesta en los suelos varió desde un 12,37% hasta 83,7%, estos valores muestran la amplia variabilidad de los suelos en su capacidad de respuesta a la aplicación de la fuente soluble de fósforo. Dicha variabilidad se debe a la diferencia en el contenido de P disponible de los suelos, que va desde 6 mg.kg⁻¹ en el suelo Cam hasta 265 mg.kg⁻¹ en el suelo Cub (Cuadro 3).

Cuadro 7. Respuesta de la materia seca del maíz (g.pote⁻¹) a la aplicación de fósforo en doce suelos.

Suelo	Sin P	Con P	Media
Cam	2,4 a	19,4 cd	10,9
V	4,1 ab	14,6 ab	9,4
Port	5,1 abc	22,5 cde	13,9
VP	7,4 bcd	11,6 ab	9,5
B	9,1 cd	24,2 de	16,7
S	10,7 de	16,7 b	13,7
Pald	11,1 de	22,0 cde	16,6
B2	14,2 ef	26,4 e	20,3
G	14,9 ef	17,8 bc	16,3
Uri	16,7 fh	23,8 de	20,2
R	19,9 h	32,5 f	26,2
Cub	<u>39,4</u> i	<u>38,6</u> g	39,0
Media	12,9	22,5	

Valores en las columnas seguidos por diferentes letras son significativamente diferentes para valores P<0,05 y subrayados en las filas son significativamente iguales, según Tukey.

La concentración del P en el tejido vegetal (Cuadro 8) donde no se aplicó fertilizante varió entre 0,22% en el suelo V y 0,52% en Cub. Solo en cuatro de los suelos (V, Cam, B2 y G) el % de P fue menor a 0,3 valor considerado bajo (Jones *et al.*, 1991), en dos de los suelos (Uri y Cub) la concentración de P fue mayor a 0,5% valor considerado alto. Los porcentajes en el rango de 0,33 y 0,35 % corresponden al nivel de suficiencia para el maíz de 30 días de edad.

Cuando se aplicó fertilizante fosfatado a los suelos la concentración de P en el tejido en 9 de los 12 suelos correspondió a la categoría de suficiente, entre 0,34 y 0,48%, solo en tres suelos, R, B y Cub, fue alto, 0,52, 0,52 y 0,62% respectivamente.

Cuadro 8. Respuesta de la concentración de P (%) en el tejido del maíz a la aplicación de P a doce suelos.

Suelo	Sin P	Con P	Media
V	0,22 d	0,34 a	0,28
Cam	0,25 d	0,48 de	0,36
B2	0,27 d	0,33 ab	0,32
G	0,27 d	0,43 cd	0,35
Port	0,33 c	0,41 bc	0,37
VP	0,33 c	0,42 bc	0,37
R	0,33 c	0,52 e	0,42
S	0,35 c	0,45 cde	0,40
Pald	0,36 c	0,41 bc	0,38
B	0,38 c	0,52 e	0,45
Uri	0,51 b	0,40 bc	0,46
Cub	0,52 a	0,62 f	0,62
Media	0,35	0,45	

Valores en las columnas seguidos por diferentes letras son significativamente diferentes para valores $P < 0,05$, según Tukey.

La producción de materia seca mostró estar altamente relacionada con la concentración del P en el tejido vegetal. Los datos de materia seca y porcentaje de P se ajustaron a un modelo de regresión lineal (Figura 22) con un coeficiente de determinación $R^2=0,618$, lo que indica que la producción de materia seca del maíz se podría explicar, en un 61,8% de los casos, por el efecto de la disponibilidad del P en el suelo y su acumulación en el tejido de la planta.

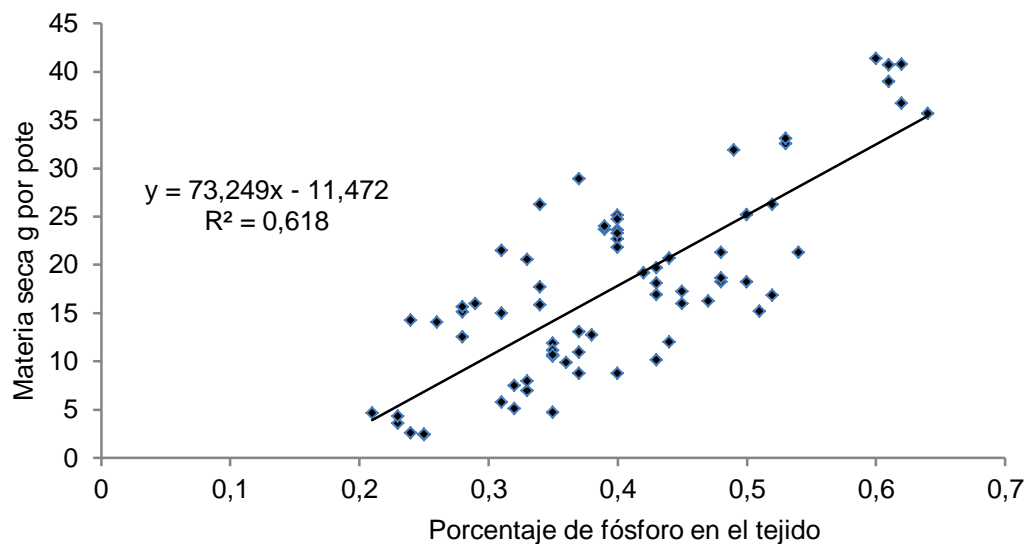


Figura 22. Relación de la materia seca del maíz con la concentración de fósforo en el tejido.

V.4.2. Cambios en las fracciones de fósforo en el suelo

El desarrollo del maíz, por 35 días, tuvo diferentes efectos sobre las fracciones de Pi en los suelos donde se aplicó o no fertilizante fosfatado (Cuadro 9).

La fracción PiR mostró un decrecimiento significativo por efecto de la planta con o sin aplicación de fertilizante; en los suelos VP y Cam no hubo una variación significativa (Cuadro 9). El PiL mostró el mismo comportamiento que PiR. Otros autores encontraron resultados parecidos, Yang y Jacobsen (1990), Vu *et al.* (2008), Wang *et al.* (2008) trabajaron con cereales y leguminosas y señalaron que hubo una disminución de las fracciones lábiles por efecto de la planta. Estos cambios se pueden explicar porque las fracciones PiR y PiL son consideradas disponibles para la planta por Bowman *et al.* (1978); Hedley *et al.* (1982) y Tiessen y Moir (1993), debido a que el PiR es una forma intercambiable libre, la resina no modifica químicamente la solución del suelo, y el Pi extraído con bicarbonato (PiL) sólo introduce pequeños cambios químicos que, de alguna manera, se asemejan a la acción de las raíces, por lo cual éstas dos fracciones estarían disponibles en el suelo.

Cuadro 9. Fracciones de Pi (mg.kg^{-1}) en los suelos sin planta y con planta, sin P (0P) y con P (1P) después de 35 días de la siembra de maíz.

Suelo	PiR*		PiL		PiML		PiLL		PiO	
	Sin Planta	Con Planta	Sin Planta	Con Planta	Sin Planta	Con Planta	Sin Planta	Con Planta	Sin Planta	Con Planta
B 0P	1,84 a	1,55 b	21,20a	15,91b	66,00 a	58,83 b	10,70 a	9,49 b	39,34 a	38,94 a
B 1P	23,11 a	21,29 b	94,39a	75,17b	137,55a	116,78b	18,08 a	16,48 b	50,58 a	46,83 b
Cub 0P	14,10 a	10,69 b	213,30a	178,89b	1114,04a	1072,75b	136,86 a	138,67 a	578,12 a	576,40 a
Cub 1P	24,94 a	21,59 b	287,43a	256,31b	1243,49 a	1165,80 b	155,13 b	172,57 a	495,25 a	490,19 a
R 0P	13,75 a	10,45 b	50,32a	43,44b	85,93a	81,33b	27,12 a	21,56 b	43,24 a	39,50 a
R 1P	69,38 a	55,50 b	93,97a	76,43b	147,20a	140,43a	30,95 a	31,32 a	37,84 a	36,41 a
Uri 0P	29,25 a	25,38 b	73,64a	60,38b	159,13a	159,76a	21,07 b	26,99 a	99,06 a	94,30 b
Uri 1P	71,03a	40,13b	133,06a	99,01b	211,91a	205,15a	34,87 a	38,03 a	101,58 a	103,63 a
Port 0P	1,89a	1,54 b	17,64a	10,53b	87,73a	84,57a	37,64 a	39,72 a	111,87 a	112,57 a
Port 1P	13,77a	11,39 b	79,27a	69,19b	214,11a	161,92b	45,69 a	45,40 a	108,21 a	109,14 a
Pald 0P	2,60a	2,21 b	33,47a	23,07b	164,74a	165,31a	116,89 a	115,97 a	153,70 a	144,63 b
Pald 1P	21,96a	17,73 b	86,31a	81,55b	309,10a	282,46b	130,19 a	122,13 b	156,08 a	156,40 a

Suelo	PiR		PiL		PiML		PiLL		PiO	
	Sin Planta	Con Planta	Sin Planta	Con Planta	Sin Planta	Con Planta	Sin Planta	Con Planta	Sin Planta	Con Planta
G 0P	14,27a	11,90 b	35,81a	26,91b	51,51a	52,91a	15,62 a	16,27 a	24,07 a	23,16 a
G 1P	70,38a	58,80 b	87,06a	75,02b	103,82a	80,90 b	20,70 b	22,01 a	28,82 a	29,39 a
V 0P	4,56a	3,06 b	9,35a	5,95b	7,59 b	9,97a	7,56 a	6,65 b	11,94 a	12,37 a
V 1P	63,75a	51,71b	41,67b	48,43a	68,20a	34,14 b	8,10 a	6,38 b	14,31 a	15,23 a
S 0P	8,77a	6,78b	41,60a	28,05b	43,12a	43,57a	8,70 b	10,39 a	39,99 a	36,31 a
S 1P	63,60a	45,53b	104,54a	94,68b	101,24a	91,04 b	16,47 a	14,66 a	42,04 a	39,08 a
VP 0P	2,39a	1,48a	8,21a	6,99b	97,72a	90,15a	7,56 a	6,65 b	95,97 a	91,63 b
VP 1P	5,56a	4,80a	43,08a	39,53b	238,71a	197,77b	24,10 a	24,71 a	118,83 b	134,68 a
Cam 0P	1,12a	0,94a	6,14a	4,45b	28,62a	27,91a	10,28 a	7,59 b	48,28 a	50,66 a
Cam 1P	32,39a	27,26b	69,07a	55,71b	94,15a	88,67b	23,74 a	23,97 a	54,39 a	53,29 a
B2 0P	16,54a	14,28b	32,86a	25,95b	78,51 a	74,25 a	83,18 a	82,23 a	42,51 a	43,08 a
B2 1P	61,34a	51,47b	82,25a	61,31b	96,73 a	90,08 b	132,14 a	124,28 b	54,23 a	54,95 a

*R: resina; L: Lábil (NaHCO_3); ML: moderadamente lábil (NaOH); LL: ligeramente lábil (HCl 1M); O: ocluido (HCl concentrado).
 Letras iguales en la misma fila, dentro de la misma fracción, no son significativamente diferentes (t-Student $P \leq 0,05$).

La incubación de los suelos con fosfato por 140 días mostró que existe una alta acumulación de P en las formas disponibles PiR y PiL, las diferencias entre el tratamiento con planta respecto a sin planta son muy amplias, una indicación de que una parte considerable del P del fertilizante paso a ser disponible después de la incubación.

El comportamiento de PiML y PiLL, fue diferente a las formas PiR y PiL. Donde no se aplicó P al suelo PiML disminuyó con la planta en solo tres suelos, y donde se usó fosfato se encontró disminución de la fracción en diez de los doce suelos (Cuadro 9). La fracción PiLL mostró una disminución significativa en nueve de los suelos bajo el efecto de la planta y en solo cuatro suelos cuando estos se incubaron con fosfato. Estos resultados muestran que la disponibilidad el P en el suelo bajo la forma PiML es mayor que en PiLL y, que, ambas formas son menos disponibles o usadas por la planta que PiR y PiL.

El tipo de suelo tuvo un alto efecto sobre el comportamiento de las formas lábiles de P (Cuadro 7). En los suelos ácidos la absorción de P por las plantas ha sido relacionada con el P-Al y P-Fe (Patiram *et al.*, 1990), los cuales son extraídos con NaOH (PiML), la disminución de esta forma de P moderadamente lábil es una indicación de que la planta usa, en cierta medida, el P-Al y P-Fe. Bahl y Singh (1997) mostraron que en suelos ácidos el maíz es capaz de usar más fósforo de la forma P-Al, para su nutrición. La importancia de la fracción PiML como fuente de P disponible ha sido señalada por Gikonyo *et al.* (2008), a pesar de que esta fracción es considerada moderadamente disponible.

Los resultados de este trabajo indican que la disponibilidad de PiML, para la planta, está asociada a las características de los suelos, es notable que la mayor disminución de PiML en los suelos tuvo lugar en los que se aplicó fertilizante, es decir, en la medida que la fracción es mayor su disponibilidad para el maíz aumenta. Rose *et al.* (2010) encontraron que el trigo, canola y haba, no usaron el PiML en suelos ácidos, este comportamiento fue atribuido al tamaño pequeño de la fracción.

De acuerdo a los resultados obtenidos, el maíz fue capaz de usar el fósforo de la fracción PiLL, en seis suelos donde no se fertilizó con fósforo, las diferencias entre 0P y 1P fueron significativas (Cuadro 9), este comportamiento solo se observó en tres suelos

donde se aplicó el fertilizante, lo que indicaría que la disponibilidad del P de la fracción PiLL, está relacionada con algunas de las características de los suelos. La fracción PiLL está asociada al Ca y las alteraciones de los niveles de P-Ca encontradas por Rosolem *et al.* (2014) llevaron a concluir que el pasto Congo tiene la habilidad de utilizar el PiLL en suelos ácidos, por su parte Rose *et al.* (2010) observaron que el garbanzo puede utilizar el PiLL en un suelo ácido.

Solo en tres suelos se encontraron alteraciones del PiO, por efecto de la planta, en el tratamiento de OP y en un solo suelo donde se aplicó fertilizante, debido posiblemente a que esta fracción es considerada muy poco soluble.

Los cambios encontrados en las fracciones orgánicas de fósforo fueron de menor magnitud que las de fósforo inorgánico (Cuadros 9 y 10). La fracción PoL en el tratamiento de OP se incrementó significativamente por efecto de la planta y decreció en otros dos suelos, la disminución del PoL fue explicada por Gatiboni *et al.* (2007) con base a la absorción del Pi por la planta que daría lugar a una mineralización del PiO, para sustituir el usado por la planta (Gikonyo *et al.* 2008).

Pocos cambios se observaron en las fracciones PoML y PoLL con el desarrollo de la planta, solo en dos suelos se registró una disminución significativa de PoML por efecto del fertilizante y en tres suelos en el caso de la fracción PoLL (Cuadro 10). Resultados parecidos fueron mostrados por Saltali *et al.* (2007). Contrariamente se encontraron incrementos de la fracción PoML por efecto del crecimiento de maíz en cuatro suelos, resultados similares fueron reportados por George *et al.* (2002) cuando trabajaron con maíz, por otra parte Hedley *et al.* (1994) señalaron que el arroz no logró afectar la fracción PoML lo que coincide con lo encontrado en la mayoría de los suelos donde se sembró maíz en el presente trabajo.

La fracción PoO mostró muy poca variación (Cuadro 10), solo en dos suelos se encontraron cambios por efecto de la planta, Ochwoh *et al.* (2005a) señalaron que esta fracción es muy estable y difícil de ser modificada por la planta y los microorganismos del suelo.

Algunos autores han señalado que ciertas especies son capaces de utilizar el P residual (Kamh *et al.*, 1999, Vu *et al.*, 2008), sin embargo, en este trabajo no se

encontró modificaciones de esta fracción, considerada por Guo *et al.* (2000) altamente recalcitrante y, por consiguiente, no soluble por efecto del desarrollo del maíz por 35 días (Cuadro 10).

Cuadro 10. Fracciones de Po y P residual (mg.kg^{-1}) en los suelos sin planta y con planta, sin P (0P) y con P (1P) después de 35 días de la siembra de maíz.

Suelo	PoL*		PoML		PoLL		PoO		P Residual (PRC)	
	Sin Planta	Con Planta	Sin Planta	Con Planta	Sin Planta	Con Planta	Sin Planta	Con Planta	Sin Planta	Con Planta
B 0P	10,97a	9,29a	42,14a	45,96a	1,41 a	1,75 a	16,32	15,27	100,24a	99,52a
B 1P	22,22b	26,65a	29,81b	36,59a	1,26 a	1,54 a	15,55	12,34	110,54a	106,75a
Cub 0P	43,77a	46,88a	193,21a	193,43a	1,29 a	1,76 a	64,27	63,98	100,75a	98,07a
Cub 1P	40,58a	13,58b	277,74a	260,88 a	9,66 a	8,44 a	77,66	79,70	126,53a	123,24a
R 0P	16,67a	13,31a	31,58a	36,11a	3,00 a	3,09 a	10,88	11,35	61,68a	61,28a
R 1P	11,55a	13,81a	33,68a	18,99b	7,64 a	6,07 a	15,39	12,69	63,32a	61,93a
Uri 0P	10,50b	12,37a	56,62a	47,29a	8,01 a	5,35 a	13,91	11,01	88,33a	86,92a
Uri 1P	49,97a	31,88b	33,30b	48,87a	5,80 a	5,77 a	11,77	10,44	71,25a	71,92a
Port 0P	15,13a	9,48b	97,41a	103,45a	2,54 a	1,56 a	9,93	9,65	117,02a	119,05a
Port 1P	16,61a	11,10b	78,18a	71,93a	2,83 a	2,58 a	63,14	66,93	105,28a	104,25a
Pald 0P	17,15b	22,93a	128,53b	132,30a	4,03 a	2,33 b	36,55	36,08	110,51a	108,54a
Pald 1P	20,87a	11,22b	104,44b	127,52a	10,75 a	3,46 b	34,26 b	31,47 a	109,01a	107,17a

Suelo	PoL*		PoML		PoLL		PoO		P Residual (PRC)	
	Sin Planta	Con Planta	Sin Planta	Con Planta	Sin Planta	Con Planta	Sin Planta	Con Planta	Sin Planta	Con Planta
G 0P	6,56a	7,67a	19,83a	19,52a	4,70 a	3,73 a	22,51	20,47	83,63a	81,89a
G 1P	21,37a	25,48a	26,42a	28,17a	5,07 a	2,77 b	37,25	35,45	101,35a	99,42a
V 0P	12,53a	13,02a	20,96a	18,80a	1,27 a	0,88 b	8,81 b	9,69 a	74,43a	74,17a
V1P	33,46a	26,87b	27,94a	32,30a	1,99 a	1,62 b	11,23	8,10	80,85a	79,62a
S 0P	23,22a	18,95a	28,19a	26,15a	5,47 a	3,13 b	6,51	9,30	79,45a	86,35a
S 1P	14,31a	7,18b	26,71a	22,31b	3,96 a	2,02 b	8,43	11,25	84,99a	87,71a
VP 0P	18,10a	14,84b	41,81b	51,39a	1,71 a	1,41 a	7,18	8,04	123,83a	121,62a
VP 1P	18,28a	17,54a	30,91a	33,21a	2,43 a	1,20 b	14,67	15,00	116,92b	122,82a
Cam 0P	12,61a	14,31a	45,90a	43,44a	1,69 a	1,74 a	16,95	17,13	108,90a	107,09a
Cam 1P	22,57a	25,09a	36,57a	29,05a	1,92 a	1,66 a	12,14	11,13	107,55a	106,77a
B2 0P	16,34 a	15,64 a	63,55 a	64,28 a	1,69 a	1,82 a	23,05 a	22,80 a	89,55a	88,42a
B2 1P	46,52 b	50,24 a	64,25 a	61,24 a	2,28 a	2,43 a	25,04 a	26,22 a	87,58a	88,15a

*L: Lábil (NaHCO_3); ML: moderadamente lábil (NaOH); LL: ligeramente lábil (HCl 1M); O: ocluido (HCl concentrado); RC: recalcitrante (H_2SO_4).

Letras diferentes en la misma fila, dentro de la misma fracción, son significativamente diferentes (t-Student $P \leq 0,05$).

V.5. Relación de las fracciones de fósforo en el suelo con la materia seca y fósforo absorbido por el maíz.

Para conocer el grado de asociación de la materia seca del maíz y del P absorbido con las distintas fracciones de fósforo en el suelo se calcularon los respectivos coeficientes de correlación, que se muestran en el cuadro 11.

Cuadro 11. Coeficientes de correlación entre la materia seca (MS) y fósforo absorbido (Pab) por el maíz y las fracciones de fósforo inorgánico (Pi) y orgánico (Po) del suelo.

Variables	PiR*	PiL	PiML	PiLL	PiO
MS	0,45**	0,86**	0,72**	0,62**	0,76**
Pab	0,34**	0,92**	0,83**	0,62**	0,76**
		PoL	PoML	PoLL	PoO
MS		0,45**	0,51**	0,52**	0,60**
Pab		0,40**	0,61**	0,51**	0,65**

*R: Resina, L: lábil (NaHCO_3); ML: moderadamente lábil (NaOH);

LL: ligeramente lábil (HCl 1M), O: ocluido (HCl concentrado), **: $P < 0,01$.

La MS y Pab del maíz mostraron estar significativamente relacionados con todas las formas del Pi en el suelo. Los coeficientes de correlación para PiL con la MS y Pab fueron los más altos, 0,86 y 0,92 respectivamente, seguidos por los de PiML, PiO, PiLL y PiR.

Los coeficientes de correlación encontrados con Po fueron más bajos que los correspondientes de Pi, lo que indica la menor disponibilidad del P orgánico en el suelo para la planta. Las formas lábiles de Po mostraron menor grado de asociación con la MS y Pab que PoO.

La nutrición de la planta con fósforo y la producción de materia seca dependen de la disponibilidad de P en el suelo pero, sobre todo, de la capacidad de la planta para usar las diferentes formas de P en el suelo. Los modelos de regresión por paso (Stepwise) permiten conocer el grado de contribución de las fracciones de Pi y Po en el desarrollo del maíz. Las ecuaciones obtenidas se muestran en el cuadro 12.

Cuadro 12. Ecuaciones de regresión múltiple para la relación entre la materia seca y el fósforo absorbido y las fracciones de Pi y Po en los suelos.

$MS = 6,83 + 0,17PiL^*$	$R^2 = 0,76^{**}$
$Pab = 14,95 + 0,78PiL + 0,06PiML$	$R^2 = 0,84^{**}$
$MS = 1,53 + 0,40PoL + 0,48PoML + 1,02PoLL$	$R^2 = 0,61^{**}$
$Pab = -9,89 + 0,49PoML + 1,15PoL + 5,21PoLL$	$R^2 = 0,66^{**}$

MS: Materia seca, Pab: P absorbido, *L: Lábil ($NaHCO_3$); ML: moderadamente lábil ($NaOH$); LL: ligeramente lábil (HCl 1M); **: $P < 0,01$

La formación de la MS del maíz mostró una alta dependencia de la fracción PiL, considerada disponible para la planta, el comportamiento de la MS se podría atribuir en un 76% de los casos al PiL. La ecuación de regresión que relaciona la absorción de P con el Pi resultó de carácter múltiple, donde las variables que afectan el P absorbido fueron PiL y PiML, con un coeficiente mayor para la variable PiL, por consiguiente con mayor capacidad de predicción. El coeficiente de determinación, 0,84, fue altamente significativo, lo que indica que en un 84% de los casos la absorción de P por la planta podría ser atribuido a la presencia de las fracciones PiL y PiML. Mehmood *et al.* (2015) desarrollaron una ecuación con la cual demostraron que la fracción PiL fue el mejor predictor para el P absorbido por el maíz, pero también en el caso del pasto *Setaria*, crecido en un suelo ácido, Gikonyo *et al.* (2008) demostraron que la absorción de P era altamente dependiente de las fracciones PiL y PiML.

Los resultados, encontrados en el trabajo, sugieren que los fosfatos de Fe y Al, solubilizados en parte, por las soluciones extractoras de $NaHCO_3$ y $NaOH$, son una fuente de Pi lábiles disponibles para las planta, Samadi y Gilkes (1998,1999) también llegaron a esta misma conclusión.

Las fracciones de Po lábiles son fácilmente mineralizadas, en corto tiempo, para proveer de P disponible para la planta, eso explica la dependencia de la materia seca y del P absorbido de las formas de P orgánicas lábiles que se muestran en las ecuaciones del cuadro 12. Al respecto, Zhou *et al.* (2012) estudiaron los mecanismos de la rizósfera, de dos variedades de trigo, para utilizar eficientemente el P y

encontraron que las dos variedades tenían la habilidad de mineralizar las fracciones de PoL y PoML, es conocido que la raíz libera C orgánico que estimula el incremento de la actividad microbial en la rizósfera (Toal *et al.*, 2000), por lo que se presume que el PoL y PoML son mineralizados y utilizados por el maíz y por lo tanto forma parte del P disponible.

La ecuación de mejor ajuste de la materia seca con las fracciones PoL, PoML y PoLL fue una función múltiple, donde PoLL mostró el coeficiente más alto 1,02, más del doble de los otros dos coeficientes. El $R^2=0,61$ fue menor que el encontrado para la ecuación de la materia seca con PiL $R^2=0,76$ (Cuadro 12).

El P absorbido también resultó altamente dependiente de las tres fracciones de Po lábiles que influyeron sobre la materia seca. El coeficiente de la variable independiente PoLL fue el más alto 5,21, esto es 5 veces mayor que el de PoL y 10 veces mayor que el de PiML. Esto sugiere que el mejor predictor de Po para explicar el comportamiento de la MS y P absorbido es la fracción PoLL.

El coeficiente de determinación $R^2=0,66$ fue parecido al de la ecuación de materia seca lo que indicaría que en aproximadamente un 61 a 66% de los casos el comportamiento de la materia seca y del Po absorbido podrían ser atribuidos al comportamiento de las formas de Po lábiles.

Los resultados encontrados con el Po sugieren que estas formas, en los suelos con los que se trabajó, tienen un alto valor como fuente potencial de P disponible para la planta, al pasar a formas inorgánicas con el tiempo.

V.6 Desarrollo radical con relación a las fracciones de fósforo.

La longitud radical del maíz mostró estar negativamente asociada a las fracciones lábiles de Pi en el suelo, los coeficientes de correlación calculados se muestran en el cuadro 13.

Cuadro 13. Coeficientes de correlación de Pearson (r) para longitud radical (LR) y las fracciones de P inorgánico.

	PiR	PiL	PiML	PiLL	PiO
LR	ns	-0,37**	-0,46**	-0,46**	ns

ns: no significativo; **: $P < 0,01$

La relación LR Pi (Cuadro 13) es de carácter negativo, y altamente significativo, lo que indica que en la medida que el P disponible en el suelo se incremente la LR decrece y al disminuir el P disponible la LR aumenta para poder explorar un mayor volumen de suelo para encontrar fósforo. Este comportamiento ha sido mostrado por otros investigadores con diferentes especies (Rychter y Randall, 1994). Sequera y Ramírez (2003) mostraron que en la medida que se incrementó el P disponible en el suelo, por efecto de la aplicación de los fertilizantes, la LR del maíz decreció significativamente.

V.7 Relación de la materia seca del maíz, fósforo disponible y fracciones de fósforo inorgánico en el suelo

Las soluciones extractoras de fósforo disponible de Olsen, Bray I y Mehlich III, son usadas por los diferentes laboratorios de análisis de suelos en el país, para desarrollar recomendaciones de dosis de fertilizantes.

Los datos obtenidos para materia seca, fósforo absorbido y fósforo disponible por los métodos señalados, mostraron coeficientes de correlación muy altos y significativos (Cuadro 14).

Cuadro 14. Coeficientes de correlación simple entre la materia seca, el P absorbido por el maíz y el P disponible determinado por tres métodos.

	Olsen	Bray I	Mehlich III
MS (g.pote ⁻¹)	0,84**	0,83 **	0,77**
Pab	0,91**	0,87**	0,80**

MS: Materia seca, Pab.: P absorbido, **: P<0,01

El P por Olsen y Bray I correlacionaron mejor que Mehlich III, con materia seca y P absorbido, lo que indica que el uso de estos dos métodos para predecir el fósforo disponible en los suelos es correcto, en los trabajos de calibración con diferentes cultivos y suelos de diferentes valores de pH Ramírez *et al.* (1987, 1988) y Ramírez (1989) mostraron resultados parecidos. Vucãns *et al.* (2008) señalaron que el método Olsen es mejor para estimar el P disponible en los suelos neutro y calcáreos, sin embargo Tiessen y Moir (1993) concluyeron que el método de Olsen puede ser usado

satisfactoriamente en suelos ácidos y calcáreos lo que coincide con lo publicado por Ramírez *et al.* (1987, 1988) y Ramírez y Morales (1989).

Las fracciones de fósforo, extraídas del suelo por medio del fraccionamiento secuencial de Hedley *et al.* (1982) y modificado por Tiessen y Moir (1993) permiten conocer la forma del fósforo en el suelo de la cual proceden. El fósforo disponible en el suelo tiene su origen en las distintas fracciones y el equilibrio entre ellas determina la disponibilidad, de acuerdo con Fransson (2001).

Las formas de PR y PiL han sido consideradas como disponibles para la planta por Tiessen y Moir (1993). La eficiencia de las soluciones extractoras de P, para estimar el nivel de P disponible en el suelo, debería estar relacionada con las fracciones lábiles del suelo, para conocer esta relación se calcularon las ecuaciones de regresión por paso (Cuadro 15).

Cuadro 15. Ecuaciones de regresión múltiple para las variables dependientes P disponible por Olsen, Bray I y Mehlich III en función de las fracciones de fósforo inorgánico (Pi).

$P_{\text{OLSEN}} = - 3,90 + 0,96 \text{ PiL} + 0,04 \text{ PiML}$	$R^2 = 0,97^{**}$
$P_{\text{BRAY I}} = - 24,67 + 2,15 \text{ PiL} + 1,37 \text{ PiR}$	$R^2 = 0,91^{**}$
$P_{\text{MEHLICH III}} = 21,42 + 1,84 \text{ PiL}$	$R^2 = 0,75^{**}$

PiL: Pi Lábil (NaHCO_3); PiML: Pi moderadamente lábil (NaOH), PiR: Pi resina,
 **: $P < 0,01$

La ecuación calculada para Olsen mostró que el fósforo extraído está estrechamente ligado a las fracciones PiL y PiML, con un coeficiente de determinación de 0,97 lo que indica que el P extraído por Olsen está determinado en un 97 % de los casos por el comportamiento de las PiL y PiML, este resultado muestra que el P ligado al Fe y Al forma parte del P asimilable por la planta, resultados similares han sido mostrados por Samadi (2006).

El fósforo por Bray I también mostró una alta dependencia de PiL de PiR, el coeficiente de determinación también fue muy alto 0,91 (Cuadro 15), este resultado concuerda con la ecuación desarrollada por Gikonyo *et al.* (2008) usando un suelo ácido.

La ecuación para P Mehlich III muestra que el determinado con este método depende solamente del PiL, el coeficiente de determinación calculado fue menor que los anteriores, 0,75, es decir que el P disponible por Mehlich III podría ser atribuido en un 75% de los casos al comportamiento de la fracción de PiL en el suelo.

Examinando las ecuaciones del cuadro 15 se ve que la fracción PiL, está presente en las tres ecuaciones, lo que sugiere que es la más activa en el suelo.

VI. CONCLUSIONES

En los suelos estudiados el P inorgánico se encuentra en mayor cantidad en la fracción PiO seguida de PiML, PiL y PiR. El P orgánico se encuentra principalmente en formas estables, PoML y PoO. La fracción residual, PRC, es mayor que las fracciones inorgánicas y orgánicas.

La incubación de los suelos, sin P, por 140 días, produjo una disminución del PiR y PiL, un aumento del PiML y poca variación en las fracciones PiLL, PiO y PRC. Lo que supone una movilización del P de las fracciones lábiles (PiR y PiL) a fracciones menos lábiles, principalmente PiML. Las fracciones PoL y PoML mostraron más cambios que PoLL y PoO, lo que refleja una menor actividad de los microorganismos en las fracciones más estables.

El fósforo incubado en los suelos, por 140 días, incrementó las fracciones PiR y PiL, en los primeros 35 días, para luego decrecer. Las fracciones PiML, PiLL y PiO mostraron un incremento continuo durante el período de incubación, lo que sugiere que parte del P de las formas PiR y PiL se incorporó a dichas fracciones. El P recuperado fue mayor en la fracción PiML, en algunos casos más del 50%, y menor en PiO. Las fracciones orgánicas, excepto PoO, aumentaron con el tiempo, pero en menor proporción que las fracciones inorgánicas.

La distribución del P aplicado al suelo mostró estar relacionada con la capacidad de adsorción de los suelos, así como, con el Fe, Al y Ca de los suelos.

El efecto de la planta de maíz, en 35 días, sobre las fracciones de P fue evidente, las fracciones PiR, PiL, PiML y PiLL mostraron una clara disminución, debido posiblemente al uso del nutriente por la planta. Las fracciones orgánicas PoL, PoML y PoLL fueron menos afectadas.

El análisis de regresión reveló que el P absorbido por el maíz y utilizado para producir materia seca proviene del PiL y PiML. De igual manera las fracciones PoL, PoML y PoLL contribuyeron a la nutrición del maíz.

La relación longitud radical con PiL, PiML y PiLL fue de carácter inverso, lo que indica que al mantener en el suelo una buena disponibilidad de P el sistema radical no aumenta en tamaño.

El P determinado por los métodos de Olsen, Bray I y Mehlich III se relacionó con el PiL, PiR y PiML de los suelos. El P extraído con Olsen mostró una mayor correlación con la materia seca y P absorbido por el maíz, lo que sugiere que este método sería un mejor estimador de la disponibilidad del P en el suelo para la planta.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Adams, M. 1995. Fundamentos de Química de Suelos. Universidad Central de Venezuela, Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. 390 p.
- Amel, O. A. y H. Sirelkhatim. 2012. Phosphorus sorption capacity as a guide for phosphorus availability of selected sudanese soil series. *Afr. Crop Sci. J.* 20 (1): 59-65.
- Adeli, A., K. R. Sistani, BAL'a y D. E. Rowe. 2005. Phosphorus Dynamics in Brolier litter-amended soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 36: 1099-1115.
- Afif, E. K. y J. A. Oliveira. 2005. Pérdida de disponibilidad y niveles críticos de fósforo Mehlich 3 en suelos no calcáreos de Asturias. *Pastos.* XXXV (2): 163-178.
- Afif, E., P. Palencia y J.A. Oliveira. 2013. Aplicaciones de fuentes de fósforo el suelo en diferentes cortes de césped cultivado. *Agrociencia.* 45: 553-566.
- Alves, V., S. Parentoni, C. Vasconcellos, A. Bahia, G. Pitta y R. Schaffert. 2001. Mechanisms of phosphorus efficiency in maize. W. J. Horst *et al.* (Eds.). *Plant nutrition—Food security and sustainability of agro-ecosystems.* 566-567.
- Araújo, M. S. B., C. E. R. Schaefer y E. V. S. Sampaio. 2004. Soil phosphorus fractions from toposequences of semi-arid Latosols and Luvisols in northeastern Brazil. *Geoderma.* 119: 309-321.
- Ayodele, O. y A. Agboola. 1981. Evaluation of Phosphorus Fixation Capacity of Tropical Savannah Soils of Western Nigeria *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45(3): 462-464.
- Bahl, G.S. y A., Singh. 1997. The inorganic soil phosphorus fractions an available P as influenced by greenmanuring, cropping and P fertilization. *J. of the Indian Soc. Sci.* 45(1): 19-23.
- Barber S. 1962. A diffusion and mass-flow concept of soil nutrient availability. *Soil Sci.* 93: 39-49.
- Barnhisel, R. y Bertsch P. (Comp.). 1982. Aluminum. *Methods Of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties.* Second edition. Number 9 (part 1).USA.
- Bascones, L. y J. Lopez. 1961. Ensayo de calibración de métodos para la determinación de P asimilable en suelos de la Colonia Agrícola de Turén. *Memorias 11 Jornadas Agronómicas.* 23 Nov. Maracay. Edo. Aragua.
- Beck, M. y P. Sanchez. 1994. Soil phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on a typic Paleudult. *Soil Sci.* 34: 1424-1431.
- Ben-Gal, A. y L. M. Dudley. 2003. Phosphorus available under continuous point source irrigation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 1449-1456.

- Bertrand, I., P. Hinsinger, B. Jaillard, J.C., Arvieu. 1999. Dynamics of phosphorus in the rhizosphere of maize and rape grown on synthetic, phosphated calcite and goethite. *Plant Soil* 211:111-119.
- Blake, L., S. Mercik, M. Koerschen, S. Moskal, P.R. Poulton, K.W.T. Goulding, A. Weigel y D.S. Powlson. 2000. Phosphorus content in soil uptake by plants and balance in three European long-term field experiments. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 56: 263-275.
- Blake, L., A. E. Johnston, P. R. Poulton y K. W. T. Goulding. 2003. Changes in soil phosphorus fractions following positive and negative phosphorus balances for long periods. *Plant Soil* 254: 245-261.
- Boschetti, N. G., C. E. Quintero, R. A. Benavidez y L. Giuffre. 2003. Cuantificación de las fracciones orgánicas e inorgánicas de fósforo en suelos de la Mesopotamia Argentina. *Ciencia del suelo.* 21(1): 1-8.
- Bouyoucos, G. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agron. J.* 54: 464-465.
- Bowman, R. A., S. R. Olsen y F. S. Watanabe. 1978. Greenhouse Evaluation of Residual Phosphate by Four Phosphorus Methods in Neutral and Calcareous. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42 (3): 451-454.
- Bray, R. H. y L. T. Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 64: 101-109.
- Buehler, S., A. Oberson, I. M. Rao, D. K. Friesen y E. Frossard. 2002. Sequential phosphorus extraction of a ³³P-Labeled Oxisol under contrasting agricultural systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 868-877.
- Bunemann, E.K., F. Steinebrunner, P.C. Smithson, E. Frossard y A Oberson. 2004. Phosphorus dynamics in a highly weathered soil as revealed by isotopic labeling techniques. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 1645-1655.
- Cardoso, I.M., P. Van der Meer, O. Oenema, B. H. Janssen y T. W. Kuyper. 2003. Analysis of ³¹P-NMR in oxisols under agroforestry and conventional coffee systems in Brazil. *Geoderma* 112: 51-70.
- Casanova, E. 2005. Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Central de Venezuela. Caracas. 487 p.
- Cassagne, N., M. Remaury, T. Gauquelin y A. Fabre. 2000. Forms and profile distribution of soil phosphorus in alpine Inceptisols and Spodosols (Pyrenees, France). *Geoderma.* 95: 161-172.

- Chand, M., N.S Randhawa y A.C Vig. 1995. Standardization of equilibration time for phosphorus adsorption studies in low P fixing alluvial soils. *J. Indian Soc. Soil Sci.*43: 676-678.
- Chang, S. C. y W. K. Chu. 1961. The fate of soluble phosphate applied to soils. *J. Soil Sci.* 12: 286-293.
- Chang, S. C. y M. L. Jackson. 1957. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Sci.* 84: 133-144.
- Chang, S. C. y M. L. Jackson. 1958. Soil phosphorus fraction in some representative soil. *J. Soil Sci.* 9: 108-119.
- Cox, F. R. 1994. Predicting increase in extractable phosphorus from fertilizing soils of varying clay content. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1249-1253.
- Cross, A. F. y 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.
- Da Silva, I. 2009. Chemical Fractionation of Phosphorus in Bottom Sediments from the Tietê-Pinheiros-Billings River System, São Paulo. *Terrae.* 6(1): 52-58.
- Daroub, S. H., F. J. Pierce y B. G. Ellis. 2000. Phosphorus fractions and fate of phosphorus-33 in soils under plowing and no-tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:170-176.
- Dobermann, A., T. George y N. Thevs. 2002. Phosphorus fertilizer effects on soil phosphorus pools in acid upland soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 652-660.
- Doula, M., A. Ioannou y A. Dimirkou. 1996. Thermodynamics of phosphate adsorption-desorption by alfisols, entisols, vertisols and inceptisols. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 27: 1749-1764.
- Fassbender, H. W., L. Muller y F. Balerdi. 1968. Estudios del fósforo en suelos de América Central II: Formas y su relación con las plantas. *Turrialba.* 18: 333-347.
- Fassbender, H. W. y E. Bornemisza. 1987. Química de suelos con énfasis en suelos de América latina. Colección Libros y Materiales Educativos N° 81. Costa Rica. 420 p.
- Fernández, C., R. Mendoza y S. Vazquez. 2006a. Efecto de la incubación sobre fracciones de fósforo extraídas en suelos fertilizados ante distintos sistemas productivos. *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas.* Argentina.
- Fernández, C., R. Mendoza y S. Vazquez. 2006b. fracciones de fósforo en suelos de corrientes con producción citrícola, arrocera y pastoril. *Ci. Suelo (Argentina)* 24(2): 161-168.

- Fox, R. L. y E. J. Kamprath. 1970. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirements of soil. *Soil Soc. Am. Proc.* 34: 902-907.
- Fransson, A. M. 2001. Evaluation of oxalate/oxalic acid for extracting plant available phosphorus in unfertilized acid soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 32(15&16): 2469-2484.
- Fransson, A.M., I. M. van Aarle, P. A. Olsson y G. Tyler. 2003. *Plantago lanceolata* L. and *Rumex acetosella* L. differ in their utilisation of soil phosphorus fractions. *Plant Soil* 248: 285–295.
- Friesen, D. K., I. M. Rao, R. J. Thomas, A. Oberson y 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. Condon, A. Oberson, S. Sinaj, J.C. Fardeau. 2000. Processes governing phosphorus availability in temperate soils. *J. Environ. Qual.* 29: 15-23.
- Fuentes, J. 1999. El suelo y los fertilizantes, Ediciones Mundi-Prensa, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, 5ª edición, 126-133.
- Galantini, J.A., L. Suñer y H. Krüger. 2005. Dinámica de las formas de P en un haplustol de la región semiárida pampeana durante 13 años de trigo continuo. *RIA.* 34 (2): 13-31.
- Gardner, L. R. 1990. The role of rock weathering in the phosphorus budget of terrestrial watersheds. *Biogeochemistry* 11: 97-110.
- Garófalo, L. H., V. B. Campos, M. S. D. S. Sousa, D. H. Guedes Filho, M. A. Estrela, y A. D. de Barros. 2012. Phosphate sorption in oxisols in Paraíba state, Brazil, classified as solution equilibrium phosphorus. *Iranica J. Energy Environ.* 3(1). 17-22.
- Gatiboni, L. C., J. Kaminski, D. S. Rheinheimer y J. P. Flores. 2007. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo.* 31:691-699.
- Gatiboni, L. C., C. M. B. Oliveira, P. R. Ernani, J.A. Almeida y D. J. Miquelluti. 2010. Soil available phosphorus by Mehlich-1, Mehlich-3 and anion exchange resin and its sensitivity to soil clay content. 19th World Congress of Soil Science. Australia.
- George, T.S., P.J. Gregory y M. Wood. 2002. Phosphatase activity and organic acids in the rhizosphere of potential agroforestry species and maize. *Soil Biol Biochem* 34:1487-1494.
- Gichangi, E.M. y P.N.S. Mkeni. 2009. Effects of goat manure and lime addition on phosphate sorption by two soils from the Transkei region, South Africa. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 40: 1-13.

- Gikonyo, E. W., A. I. R. Zaharah, M. M. Hanafi y A. R. Anuar. 2008. Evaluation of phosphorus pools and fractions in an acid tropical soil recapitalized with different phosphorus sources. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 39: 1385–1405.
- Gilabert de B. J., de R.I. López., de R.R. Pérez 1990. Análisis de suelos para diagnóstico de fertilidad. Manual de métodos y procedimientos de referencia. Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Maracay, Venezuela. 164 pp.
- Giuffré de López Camelo L., Heredia O.S, Z. de Sesé. 1986. Evaluación preliminar de la influencia de la materia orgánica sobre la adsorción de fósforo en algunos suelos argentinos. *Ciencia del Suelo.* 2:125:131.
- Giuffré L., G. Piccolo, R. Rosell, C. Pascale, O. S. Heredia, E. Ciarlo. 2000. Efecto antropogénico en la dinámica del fósforo en ecosistemas tropicales. XVII Congreso Argentino de la ciencia del Suelo. Argentina.
- González, R., L. Avilan y A. Chirinos. 1977. Métodos de análisis de fósforo de suelos de los Estados Barinas y Cojedes estudiados en invernadero. *Agron. Trop.* 27(1): 3-14.
- Guo, F. y R. S. Yost. 1998. Partitioning soil phosphorus into three discrete pools of differing availability. *Soil Sci.* 163(10):822-833.
- Guo, F. y R. S. Yost. 1999. Quantifying the available soil phosphorus pool with the acid ammonium oxalate method. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 651-656.
- Guo, F., R. S. Yost, N. V. Hue, C I. Evensen y J. A. Silva. 2000. Changes in phosphorus fractions in soils under intensive plant growth. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1681-1689.
- Grant, R. S. y M. A. Matthews. 1996. The influence of phosphorus availability and rootstock on root system characteristics, phosphorus uptake, phosphorus partitioning, and growth efficiency. *Am. J. Enol. Vitic.* 47(4):403-409.
- Hartono, A., P. L. G. Vieck, A. Moawad y 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 y T. Kosaki. 2006. Transformation of added phosphorus to acid upland soils with different soil properties in Indonesia. *Soil Sci. Plant Nutr.* 52:734-744.
- Havlin J. L., J. D. Beaton, S. L. Tisdale y W. L. Nelson. 1999. Phosphorus. En *Soil fertility and fertilizers. An Introduction to Nutrient management.* Sixth edition. Prentice Hall, New Jersey, USA. 499 p.
- He, Z., A. Fortuna, Z. N. Senwo, I. A. Tazisong, C. W. Honeycutt y T. S. Griffin. 2006. Hydrochloric fractions in Hedley fractionation may contain inorganic and organic phosphates. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:893-899.

- Hedley, M. J., J. W. B. Stewart y B. S. 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., Kira G.J.D., Santos M.B. 1994. Phosphorus efficiency and the forms of soil phosphorus utilized by upland rice cultivars. *Plant Soil* 158: 53-62.
- Henríquez, C. y R. Killorn. 2005. Soil P forms and P uptake under intensive plant growth in the greenhouse. *Agron. Costarric.* 29(2): 83-97.
- Hernández-Valencia, I. y M. Bautis. 2005. Cambios en el contenido de fósforo en el suelo superficial por la conversión de sabanas en pinares. *Bioagro.* 17(2): 69-78.
- Hernández-Valencia, 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(1): 57-68.
- Hill, J.O., R. J. Simpson, A.D. Moore y D.F. Chapman. 2006. Morphology and response of roots of pasture species to phosphorus and nitrogen nutrition. *Plant Soil.* 286:7-19.
- Holford, I. C. R. 1997. Soil phosphorus: its measurement, and its uptake by plants. *Aust. J. Soil Res* 35: 227-239.
- Huffman, S. A., C. V. Cole y N. A. Scott. 1996. Soil texture and residue addition effects on soil phosphorus transformation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 1095-101.
- Ibia, T. O., E. J. Udo y J. A. I. Omueti. 2009. Fractional recovery of applied phosphorus in soils of Akwa Ibom State, Niger Delta Region of Nigeria. *Environmental Res. J.* 3(1): 1-3.
- InfoStat. 2002. Infostat/Estudiantil, versión 2.0. Grupo Infostat/FCA. Universidad Nacional de Córdoba. Ed. Brujas, Córdoba, Argentina.
- Ivanoff, D. B., K. R. Reddy y S. Robinson. 1998. Chemical fractionation of organic phosphorus in selected Histosols. *Soil Sci.* 163: 36-45.
- Jackson, M. L. 1958. Phosphorus determination for soils. In *Soil Chemical Analysis*. Prentice-Hall inc. Englewood Cliffs, USA. Pp. 162-164.
- Johnston, M., A. Miles, N. y G. R. Thibaud. 1991. Quantities of phosphorus fertilizer required to raise the soil test value. *S. Afr. J. Plant Soil.* 8: 17-21.
- Jones, J. B., Jr. B. Wolf y H. A. Mills. 1991. *Plant analysis handbook a practical sampling preparation analysis and interpretation guide.* 213 p.
- Kamh, M., W.J. Horst, F. Am, H. Mostafa y P. Maier. 1999. Mobilisation of soil and fertiliser phosphate by cover crops. *Plant Soil* 211:19-27.

- Kamprath, E. J. y M. E. Watson. 1980. Conventional Soil and Tissue Tests for assessing the Phosphorus Status of Soils. In: "The Role of Phosphorus in Agriculture". (Ed.): Khasawneh F. E. American Society of Agronomy. Madison, WI. 433-469.
- Kovar, J. L. y S. A. Barber. 1988. Phosphorus supply characteristics of 33 soils as influenced by seven rates of phosphorus addition. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 160-165.
- Lambers, H., M. C. Shane, M. D. Cramer, S. T. Pearse y E. J. Veneklaas. 2006. Root structure and functioning for efficient acquisition of phosphorus: matching morphological and physiological traits. *Ann. Bot.* 98:693-713.
- Li, H., J. Shen, F. Zhang, M. Clairotte, J. J. Drevon, E. Le Cadre y P. Hinsinger. 2008. Dynamics of phosphorus fractions in the rhizosphere of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and durum wheat (*Triticum turgidum durum* L.) grown in monocropping and intercropping systems. *Plant Soil.* 312:139-150.
- Lilienfein, J., W. Wilcke, M. A. Ayarza, L. Vilela, S. Do Cardo Lima y W. Zech. 2002. Chemical fractionation of phosphorus, sulphur and molybdenum in Brazilian savannah Oxisols under different land use. *Geoderma* 96: 31-46.
- Lindsay, W. L. 1979. Chemical equilibria in soils. Wiley-Interscience, New York. 449 p.
- Linquist, B.A., P.W. Singleton y K.G. Cassman. 1997. Inorganic and organic phosphorus dynamics during a build-up and decline of available phosphorus in an Ultisol. *Soil Sci.* 162: 254-264.
- Linquist, B. y M. Ruark. 2011. Re-Evaluating diagnostic phosphorus test for rice systems based on soil phosphorus fractions and field level budgets. *Agron. J.* 103(2): 501-508.
- López-Hernández, D., M. Espinosa y M. Nino. 1989. Transformaciones en las fracciones de fósforo orgánico e inorgánico en un suelo calcáreo fertilizado. *Ciencia del suelo.* 7(12): 11-18.
- Lozano, Z., R. M. Hernández-Hernández, C. Bravo, C. Rivero, M. Toro y M. Delgado. 2012. Disponibilidad de fósforo en un suelo de las sabanas bien drenadas venezolanas, bajo diferentes coberturas y tipos de fertilización. *Interciencia.* 37(11):820-827.
- Magid, J. 1993. Vegetation effects on phosphorus fraction in set-aside soils. *Plant Soil* 149: 111-119.
- Malik, M.A., K.S. Khan, F.U. Hassan y A. Umair. 2014. Dynamics of phosphorus pools in subtropical alkaline soils. *Int. J. Agric. Biol.* 16: 293-299.

- McGrath, D.A., M.L. Duryea y 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. y E. Bremer. 2003. Relationship of soil phosphorus fractions to phosphorus soil tests and fertilizer response. *Can. J. Soil Sci.* 83: 443-449.
- Meason, D. F., T. W. Idol, J.B. Friday, P. G. Scowcroft. 2009. Effects of fertilisation on phosphorus pools in the volcanic soil of a managed tropical forest. *Forest Ecology and Management* 258: 2199-2206.
- Mehlich, A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant: a modification of Mehlich 2 extract. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 1409-1416.
- Mehmood, A., M. S. Akhtar, K.S. Khan, A. Khalid, M. Imran y S. Rukh. 2015. Relationship of phosphorus uptake with its fractions in different soil parent materials. *International J. Plant Soil Sci.* 4(1): 45-53.
- Melo, J.G. 2000. Efecto de la aplicación de materiales orgánicos sobre la dinámica del fósforo en un Oxisol. Trabajo de grado. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 97 p.
- Miller, J. C., T. Astatkie y A. Madani. 2010. Soil test phosphorus recovery from livestock manures compared with inorganic fertilizer in soil incubations. *Appl. Environ. Soil Sci.* 20: 1-6.
- Murphy, J. y J. P. Riley. 1962. A modified single solution method for determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta* 27: 31-36.
- Neufeldt, H., J. E. Da Silva, M. A. Ayarza y W. Zech. 2000. Land-use effects on phosphorus fractions in Cerrado oxisols. *Biol. Fertil. Soils.* 31: 30-37.
- Ochwoh, V. A., A. S. Claassens y P. C. de Jager. 2005a. Chemical changes of applied and native phosphorus during incubation and distribution into different soil phosphorus pools. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 36: 535-556.
- Ochwoh, V. A., A. S. Claassens y P. C. de Jager. 2005b. The effects of applied P and incubation times on the P transformations and contribution of stable P pools to the labile p following successive DMT-HFO-P extractions of a high and low P fixing soils. *African Crop Science Conference Proceedings.* 6: 526-535.
- O'Halloran, I. P., R. G. Kachanoski y J. W. B. Stewart. 1985. Spatial variability of soil phosphorus as influenced by soil texture and management. *Can. J. Soil Sci.* 65: 475-487.
- O'Halloran, I. P., J. W. Stewart y R. G. Kachanoski. 1987. Influence of texture and management practices on the forms and distribution of soil phosphorus. *Can. J. Soil Sci.* 67: 147-163.

- O'Halloran, I.P. 1993. Effect of tillage and fertilization on inorganic and organic soil phosphorus. *Can. J. Soil Sci.* 73:359–369.
- Ojo, A. O., M. T. Adetunji, K. A. Okeleye y C. O. Adejuyigbe. 2014. Changes in phosphorus fractions in manure and phosphorus fertilizer amended soil of southwestern Nigeria. *Int. J. Plant Soil Sci.* 3(1): 71-84.
- Olsen, S., C. Cole, F. Watanabe y L. Dean. 1954. Estimation of available phosphorus in soil by extraction with sodium-bicarbonate. U.S. Dept. Agr. Circ. 939.
- Onweremadu, E. U. y M. C. Ofoh. 2007. Sorptivity Characteristics of Soil Phosphorus In Relation to Land Utilization Types. *Nat. and Sci.* 5(1): 27-38.
- Parfitt, R. L. 1989. Optimum conditions for extraction of Al, Fe and Si from soils with acid oxalate. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 20: 801-815.
- Patiram, R., N. Rai. y R. N. Prasad. 1990. Forms of Soil Phosphorus and Suitable Extractants for Available Phosphorus in Acid Soils of Sikkim. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 38:237-242.
- Pérez, S. R., J. G. De Brito y G. Palma. 1979. Interpretación de análisis de suelos mediante ensayos de invernadero. I. Suelos de la zona andina del Estado Lara. *Agron. Trop.* 29: 31-58.
- Pérez, M. J., M. Morillo y L. Malpica. 2009. Eficiencia de cuatro especies de *Centrosema* para utilizar fósforo de la roca fosfórica Riecito en suelos con diferentes capacidad es de retención de fósforo. *Zootecnia Trop.* 27(3): 239-247-239.
- Perrot, K. W., F. W. Maher y B. S. Thorrold. 1989. Accumulation of phosphorus fractions in yellow-brown pumice soils with development. *New Zeal. J. Agr. Res.* 32(1): 53-62.
- Petersen, G. W. y R. B. Corey. 1966. A modified Chang y Jackson procedure for routine fractionation of inorganic soil phosphates. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 30 (5): 563-565.
- Phiri, S., E. Barrios, I.M. Rao y B.R. Singh. 2001. Changes in soil organic matter and phosphorus fractions under planted fallows and a crop rotation system on a Colombian volcanic-ash soil. *Plant Soil.* 231: 211-223.
- Picone, L., I. Capozzi, E. Zamuner, H. Echeverría y H. Sainz. 2007. Transformaciones de fósforo en un molisol bajo sistemas de labranza contrastantes. *Ci. Suelo (Argentina).* 25(2): 99-107.
- Ramírez, R., T. Rodríguez, A. Millán, C. Hernández, E. Guzmán, J. Tenías y A. Chirinos. 1987. Relación del fosforo disponible del suelo con el requerimiento y respuesta del sorgo a la fertilización con este elemento. *Agron. Trop.* 37(1-3): 85-98.

- Ramírez, R., Beg, O. Colmenares, E. Meléndez, P. Marbal, F. Blanco, E. Guzmán, C. Hernández y A. Chirinos. 1988. Relación entre la respuesta del maíz a la aplicación del fosforo y el p asimilable del suelo. *Agron. Trop.* 38(1-3): 5-20.
- Ramírez, R. 1989. Relación entre el fósforo del suelo con la respuesta de la yuca a la fertilización fosfatada. *Agron. Trop.* 39(1-3): 115-130.
- Ramírez, R. y D. Morales. 1989. Comparación de cuatro métodos de análisis del fósforo del suelo para estimar el requerimiento de P₂O₅ por el tomate (*Lycopersicon esculentum*). *Agron. Trop.* 39(1-3): 79-94.
- Ravindra, M. R. y R. Ananthanarayana. 1999. Soil test for available phosphorus and their relation with inorganic P fractions in acid soil of Karnataka. *J. of the Indian Society of Soil Sci.* 47(2): 283-287.
- Rhoades, J. 1982. Cation Exchange Capacity. *In: A.L. Page (ed.). Methods of Soil Analysis. Part 2. Agronomy Monograph N° 9. ASA & SSSA. Madison, WI. pp. 178-190.*
- Reddy, K.R., R.H. Kadlec, E. Flaig y P. M. Gale. 1999. Phosphorus retention in streams and wetlands: a review. *Critical Reviews in Environ. Sci. and Tec.* 29(1): 83-146.
- Rivaie, A. A., P. Loganathan, J. D. Graham, R. W. Tillman y 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. Agroecosys.* 82: 75-88.
- Rose, T. J., B. Hardiputra y Z. Rengel. 2010. Wheat, canola and grain legume access to soil phosphorus fractions differs in soils with contrasting phosphorus dynamics. *Plant Soil.* 326:159-170.
- Rosling, A., K. B. Suttle, E. Johansson, P. A. Van Hees y J. F. Anfield. 2007. Phosphorous availability influences the dissolution of apatite by soil fungi. *Geobiology.* 5(3): 265-280.
- Rosolem, C. A., A. Merlin y J.C. Longo. 2014. Soil phosphorus dynamics as affected by Congo grass and P fertilizer. *Sci. Agric.* 71(4): 309-315.
- Rubock, G. H., G. Guggenberger, W. Zech y B. T. Christensen. 1999. Organic phosphorus in soil size separates characterized by phosphorus-31 nuclear magnetic resonance and resin extraction. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1123-1132.
- Rychter, A. M. y D. D. Randall. 1994. The effect of phosphate deficiency on carbohydrate metabolism in bean roots. *Physiol. Plant.* 91: 383-388.
- Saltali, K., K. Kilic y R. Kocyigit. 2007. Changes in sequentially extracted phosphorus fractions in adjacent arable and grassland ecosystems. *Arid Land Research and Management.* 21:81-89.

- Samadi, A. y R. J. Gilkes. 1998. Forms of phosphorus in virgin and fertilized calcareous soils of western Australia. *Aust. J. of Soil Res.* 36: 585-601.
- Samadi, A. y R. J. Gilkes. 1999. Phosphorus transformations and their relationships with calcareous soil properties of southern Western Australia. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:809-815.
- Samadi, A. 2002. Changes in available phosphorus with time in contrasting calcareous soils with mediterranean type of climate. *Options Méditerranéennes. Série A n.50:* 205-211.
- Samadi, A. 2006. Contribution of inorganic phosphorus fractions to plant nutrition in alkaline-calcareous soils. *J. Agric. Sci. Technol.* 8: 77-89.
- Schmidt, J.P., S.W. Buol y E.J. Kamprath. 1996. Soil phosphorus dynamics during seventeen years of continuous cultivation: Fractionation analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60:1168-1172.
- Schoenau, J. J., J. W. Stewart y J. R. Bettany. 1989. Forms and cycling of phosphorus in prairie and boreal forest soils. *Biogeochemistry.* 8: 223-237.
- Selles, F., B.G. Mcconkey y C.A. Campbell. 1999. Distribution and forms of P under cultivator-and zero-tillage for continuous and fallow-wheat cropping systems in the semi-arid Canadian prairies. *Soil Till. Res.* 51: 47-59.
- Sequera, O. y R. Ramírez. 2003. Fósforo, calcio y azufre disponibles de la roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico y tiosulfato de amonio. *Interciencia.* 28(10):604-610.
- Shaheen, S. M., C. D. Tsadilas y S. Stamatiadis. 2007. Inorganic phosphorus forms in some entisols and aridisols of Egypt. *Geoderma.* 142: 217-225.
- Sharpley, A. N. 1985. Phosphorus cycling in unfertilized and fertilized agricultural soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:905-911.
- Shi, Y., N. Ziadi, A. J. Messiga, R. Lalande y Z. Hu. 2013. Changes in soil phosphorus fractions for a long-term corn-soybean rotation with tillage and phosphorus fertilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 77(4): 1402-1412.
- Smeck, N. E. 1985. Phosphorus dynamics in soils and landscapes. *Geoderma* 36: 185-199.
- Solís, P. y T. Torrent. 1989. Phosphate Fraction by Calcareous Vertisols and Inceptisols of Spain. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 456-459.
- Sollins, P., G. P. Roberston y G. Uehara. 1988. Nutrient mobility in variable and permanent-charge soils. *Biogeochemistry.* 6:181-199.

- Sotomayor, D., G. A. Martinez, R. S. Mylavarapu, O. Santana y J. L. Guzman. 2004. Phosphorus soil test for environmental assessment in subtropical soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 35(11 y 12): 1485-1503.
- Staunton, S. y F. Leprince. 1996. Effect of pH and some organic anions on the solubility of soil phosphate: implications for P bioavailability. *Eur. J. Soil Sci.* 47: 231-239.
- Suñer, L. G., J. A. Galantini y R. A. Rossel. 2000. Formas de fósforo en Molisoles de la provincia de Buenos Aires y su relación con otros parámetros edáficos. XVII Congreso argentino de la Ciencia del suelo. Argentina.
- Subero, N. 2013. Evaluación de las fracciones de fósforo y del contenido de cadmio en suelos ácidos fertilizados con fosfatos por largos periodos y su absorción por el arroz. Tesis doctoral. Universidad Central de Venezuela. Maracay. 182 p.
- Syers, J.K., A.E. Johnston y D. Curtin. 2008. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. *FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin* 18. Italy.
- Szogi, A. A., P. J. Bauer y M. B. Vanotti. 2012. Vertical distribution of phosphorus in a sandy soil fertilized with recovered manure phosphates. *J. Soils Sediments* 12:334-340.
- Tchienkoua, W. Zech y N. Sanginga. 2010. Inorganic Phosphorus Fractions Dynamics Following Phosphorus Application on Maize in Acid Soils. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.* 8(6): 793-800.
- Tennant, D. 1975. A test of a modified line intersect method of estimating root length. *J. Ecology.* 63: 995-1001.
- Thomas, R., R. Sheard y J. Moyer. 1967. Comparison of conventional and automated procedures for nitrogen, phosphorus and potassium analysis of plant material using a single digestion. *Agron. J.* 59: 240-243.
- Tiessen, H. y J.W. Stewart. 1983. Particle-size fractions and their used in studies of soil organic matter: II. Cultivation effects on organic matter composition in size fractions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 509-514.
- Tiessen, H., B. Stewart y C. Cole. 1984. Pathways of phosphorus transformations in soil of differing pedogenesis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 853-858.
- Tiessen, H., I. H. Salcedo y 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. y J. O. Moir. 1993. Characterization of available P by sequential extraction. In: Carter, M. R. (ed.). *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Boca Raton, FL. CRC. Press pp. 75-86.

- Tisdale, S. L., W. L. Nelson y J. D. Beaton. 1985. *Soil Fertility and Fertilizers*. New York: Macmillan Publishing Company. 634 p.
- Tisdale, S. L. y W. L. Nelson. 1991. *Fertilidad de suelos y fertilizantes*. UTHEA. México. 760 p.
- Toal, M.E., C. Yeomans, K. Killham, A.A. Meharg. 2000. A review of rhizosphere carbon flow modelling. *Plant Soil*. 222: 263-281.
- Tsado, P.A., O.A. Osunde, C.A. Igwe, M.K.A. Adeboye, B.A. Lawal. 2012. Phosphorus sorption characteristics of some selected soil of the Nigerian Guinea Savanna. *International J. Agr. Sci.* 2(7): 613-618.
- Turner, B.L., B.J. Cade-Menun, L. M. Condon y S. Newman. 2005. Extraction of soil organic phosphorus. *Talanta*. 66: 294-306.
- Tyler, G. 2002. Phosphorus fractions in grassland soils. *Chemosphere*. 48 (3):343–349.
- Udo, E. J. y J.A. Ogunwale. 1977. Phosphorus fractions in selected Nigerian soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41: 1141-1146.
- Van Der Zee, S. E. y W. H. Van Riemsdijk. 1986. Sorption kinetics and transport of phosphate in sandy soil. *Geoderma* 38:293-309.
- Van Getsel, M., J. N. Ladd y M. Amato. 1991. Carbon and nitrogen mineralization from two soils of contrasting texture and microaggregate stability: influence of sequential fumigation, drying and storage. *Soil Biol. and Biochem.* 23: 313-322.
- Vazquez, S., L. A. Morales y H. C. Dalurzo. 2004. Disponibilidad del fósforo en suelos ácidos de Misiones, Argentina. *Agric. Tec.* 64 (1): 50-57.
- Vu, D.T., C. Tang, R.D. Armstrong. 2008. Changes and availability of P fractions following 65 years of P application in a calcareous soil in a Mediterranean region. *Plant Soil*. 304:21-33.
- Vucāns, R., I. Līpenīte y J. Livmanis. 2008. Comparison of methods for the determination of phosphorus in carbonatic soils. *Latvian J. of Agron.* 11: 299-304.
- Wagar, B. I., J. W. B. Stewart y J. O. Moir. 1986. Changes with time in the form and availability of residual fertilizer phosphorus on Chernozemic soils. *Can. J. Soil Sci.* 66: 105-119.
- Walbridge, M.R., C. J. Richardson y W. T. Swank. 1991. Vertical distribution of biological and geochemical phosphorus subcycles in two southern Appalachian soils. *Biogeochemistry* 13: 61-85.
- Walkley, A. y 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 Sci.* 27:29-38.

- Wang, G. P., J. S. LIU, J. D. Wang y J. B. Yu. 2006. Soil phosphorus forms and their variations in depressional and riparian freshwater wetlands (Sanjiang Plain, Northeast China). *Geoderma*. 132: 59-74.
- Wang, G.P., Z.L. Zhai, J.S. Liu y J.D. Wang. 2008. Forms and profile distribution of soil phosphorus in four wetlands across gradients of sand desertification in Northeast China. *Geoderma*. 145: 59-74.
- Westin, F. C. y J. G. de Brito. 1969. Phosphorus fractions of some Venezuelan soils as related to their stage of weathering. *Soil Science*. 107(3): 194-202.
- Williams, J., Syres, J. y T. Walker. 1967. Fractionation of soil inorganic phosphates by a modification of Chang and Jackson procedure. *Soil Sci. Soc. of Am. P.* 31: 736-739.
- Wolf, A. M. y D. E. Baker. 1985. Comparisons of soil test phosphorus by Olsen, Bray P1, Mehlich-1 and Mehlich-3 methods. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 16(5): 467-484.
- Xavier, F.A.S, E.F. Almeida, I.M. Cardoso y E.S. Mendonca. 2011. Soil phosphorus distribution in sequentially extracted fractions in tropical coffee-agroecosystems in the Atlantic Forest biome, Southeastern Brazil. *Nutr. Cycl. in Agroecosys.* 89:31-44.
- Yang, J. E. y J. S. Jaccobsen. 1990. Soil Inorganic phosphorus fractions and their uptake relationships in calcareous soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1666-1669.
- Yang, J. E., C. A. Jones, H. J. Kim y 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(5y6): 855-871.
- Zamuner, E. C. y 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 y X. Sun. 1994. Effect of organic manure on organic phosphorus fractions in two paddy soils. *Biol. Fertil. Soils.* 17:64-68.
- Zhang, T.Q. y A.F. Mackenzie . 1997. Changes of soil phosphorus fractions under long-term corn monoculture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 485-493.
- Zheng, Z., L. E. Parent y J. A. Macleod. 2003. Influence of soil texture on fertilizer and soil phosphorus transformations in Gleysolic soils. *Can. J. Soil Sci.* 83: 395-403.
- Zhou, X., Huang J. G., Y. X. Zhou y W. M. Shi. 2012. The mechanism on rhizosphere phosphorus activation of two wheat genotypes with different phosphorus efficiency. *Afr. J. of Biotechnol.* 11(7): 1579-1591.

VIII. ANEXO

Longitud radical (LR) del maíz y P absorbido, 35 días después de la siembra, en doce suelos, con dos tratamientos de fertilización.

Suelo	LR (m)	Pab (mg.pote ⁻¹)
B 0P	23,29	34,19
B 1P	18,47	125,59
Cub 0P	16,31	242,80
Cub 1P	16,57	237,79
R 0P	27,63	64,71
R 1P	23,63	167,85
Uri 0P	21,58	85,17
Uri 1P	18,61	95,08
Port 0P	24,42	16,76
Port 1P	28,73	92,11
Pald 0P	22,74	39,53
Pald 1P	29,09	90,09
G 0P	21,60	40,77
G 1P	29,49	76,83
V 0P	21,84	9,20
V 1P	21,48	49,43
S 0P	29,02	37,58
S 1P	26,47	75,19
VP 0P	19,72	24,26
VP 1P	17,41	48,13
Cam 0P	26,90	6,02
Cam 1P	18,39	92,90
B2	27,47	38,49
B2	21,75	96,47

0P: sin aplicación de P, 1P: con aplicación de P (200 mg.kg⁻¹)