

Fraccionamiento secuencial de fósforo en el suelo. Comparación de dos métodos^a*Sequential extraction of phosphorus in soil. Comparison of two methods*Shirley Fernández¹ y María Belén Turrión²

¹ Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. Decanato de Agronomía, Venezuela. Email: sfernandez@ucla.edu.ve; ² Universidad de Valladolid. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias. Departamento de ciencias Agroforestales. España. bturrión@agro.uva.es

RESUMEN

Con el objetivo de comparar los dos métodos de fraccionamiento más aplicados a nivel internacional en estudios de dinámica de P edáfico, se realizó un experimento de incubación en dos suelos, un Ultisol y un Alfisol, fertilizados con superfosfertil (SFF), roca fosfórica con vinaza (RFV), roca fosfórica natural (RFN) y superfosfato triple (SFT), en una dosis única de 200 mg Pkg⁻¹ suelo. En los suelos se realizó el fraccionamiento de P por el método secuencial de Hedley *et al.* (1982), modificado por Tiessen y Moir (1993) y el de Chang y Jackson (1957) modificado por Olsen y Sommers (1982). Las fertilizaciones fosfatadas estudiadas en este trabajo incrementaron sólo las fracciones inorgánicas del P del suelo, tanto en el Ultisol como en el Alfisol. Las fracciones fueron afectadas de forma diferente dependiendo del origen del fertilizante utilizado y del tipo de suelo. El Ultisol fijó una alta proporción del P adicional. La fijación del P se evidenció por el pequeño incremento de la concentración de P en las fracciones más lábiles (fracción extraída con membrana de intercambio aniónico P-M y la fracción extraída con hidrogeno carbonato de sodio, P-NaHCO₃) y un gran incremento de la concentración en la fracción ligada al Fe y al Al para todos los fertilizantes utilizados en comparación con el testigo. La alta fijación que presentó el suelo ultisol fue debida a las altas concentraciones de Fe y Al existentes. El procedimiento de Tiessen y Moir (1993) permite realizar un estudio más detallado de la distribución del P en el suelo, ya que incluye, a diferencia del procedimiento de Olsen y Sommers (1982), las fracciones P-M y P-NaHCO₃ que además de ser las más disponibles para la vegetación están entre las afectadas por la aplicación de los fertilizantes fosfatados.

Palabras claves: Fertilización; roca fosfórica; superfosfertil; superfosfato triple; vinaza; ensayo de incubación; Ultisol; Alfisol.

ABSTRACT

An incubation assay with two soils, Ultisol and Alfisol fertilized with superphosphertil (SFF), phosphoric rock with vinaza (RFV), micronized phosphoric rock (RFN) and triple superphosphate (SFT) was done with the aim to compare the two methods more applied in studies of soil phosphorus dynamics. The two types of soil were fertilized with SFF, RFV, RFN and SFT, in an unique dose of 200 mgPkg⁻¹ and incubated for 3 weeks. The methods evaluated were the Hedley *et al.* (1982) sequential extraction procedure, modified by Tiessen and Moir (1993) and the Chang and Jackson (1957) procedure modified by Olsen and Sommers (1982).

The P soil fractions changed due the fertilizer and soil types. The Ultisol fixed a high proportion of the P added. The P fixation was evidenced with a smaller increase of P concentration in the more available fractions (P-M and P-NaHCO₃) and a high increase of P concentration in the fraction fixed to the Fe and Al, for all the fertilizers in comparison with the control treatment. The high P fixation in soil was as consequence of the high concentrations of Fe and Al. The procedure of Tiessen and Moir (1993) allows a more detailed determination of P distribution in soil, since it includes, contrary to the procedure of Olsen and Sommers (1982), the fractions P-M and P-NaHCO₃ as plant available forms and also are the P fractions affected by fertilization.

Key Words: fertilization; phosphoric rock; superphosphertil; incubation assay; Ultisol; Alfisol.

^a Recibido: 07-07-09; Aceptado: 24-03-11

INTRODUCCIÓN

Con la finalidad de estudiar las complejas interacciones que tienen lugar entre la fase sólida en la que se encuentran las reservas nutritivas del suelo en formas más o menos lábiles y las de la fase en solución que representan lo inmediatamente disponible para las plantas, resulta de gran interés conocer las formas en las que se encuentran los bioelementos menos solubles (Turrión *et al.*, 2000).

Olsen y Sommers (1982) señalaron que la determinación de P edáfico no es fácil, sin embargo, se han desarrollado varias técnicas de extracción que en cierta medida determinan la cantidad de este elemento que puede ser aprovechada por las plantas. Uno de los métodos más frecuentemente utilizados es la extracción con NaHCO_3 0,5 M a pH 8,5 en suelos neutros a alcalinos, aun cuando también se utiliza con éxito en suelos ácidos, este es el método conocido como Método Olsen (Olsen *et al.*, 1954).

El método de Olsen para la determinación de P disponible ha dado las mejores correlaciones con el fosfato tomado por la planta y con el rendimiento relativo, encontrándose correctamente sensible en algunos casos a la capacidad tampón del suelo (Holford, 1980).

Chang y Jackson (1957) desarrollaron un procedimiento secuencial para determinar las formas inorgánicas del P y sus transformaciones cuando se aplican fertilizantes a los suelos. Por otra parte, Turrión *et al.* (2000) señalaron que los extractantes utilizados en la metodología de Chang y Jackson (1957) no son específicos para los compuestos de P que se pretenden extraer y se producen reabsorciones del P que es extraído en otras fracciones. Este procedimiento utiliza NH_4F que es un reactivo tóxico y además no determina las formas orgánicas de P (Po), las cuales pueden ser un aporte significativo de P lábil al suelo.

Olsen y Sommers (1982) desarrollaron un esquema de fraccionamiento del fósforo inorgánico (Pi) basado en la capacidad de algunos reactivos para solubilizar los fosfatos presentes en algunos minerales como la apatita, estringita, variscita y goethita. Este método se basó en el método propuesto por Chang y Jackson (1957) con algunas modificaciones, principalmente la eliminación del NH_4F , ya que este reactivo puede causar la sobreestimación de algunas fracciones de P.

Con el método de Olsen y Sommers (1982) las fracciones del P edáfico son obtenidas con solventes químicos selectivos, discriminando tres clases de compuestos: el P ligado al Al (P-Al), el ligado al Fe (P-Fe) y el ligado al Ca (P-Ca), discriminando también entre las fracciones ocluidas y las no ocluidas.

En el fraccionamiento de Olsen y Sommers (1982) se diferencian las siguientes fracciones:

- Fracción de P extraíble con NaOH-NaCl , fue señalada como la fracción de P ligada al Fe y al Al (Olsen y Sommers, 1982).
- Fracción de P extraída con $\text{NaCl-citrato-NaHCO}_3$; durante el curso de la extracción de las diferentes fracciones de P, parte del P puede ser reabsorbido en la solución por otros componentes del suelo, este reactivo remueve el P adsorbido por carbonatos durante el procedimiento de extracción con NaOH (Olsen y Sommers, 1982).
- Fracción de P extraído con citrato- NaHCO_3 y $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, es la fracción de P-ocluido en los óxidos e hidróxidos de Fe (Olsen y Sommers, 1982).
- Fracción de P extraíble con HCl , extrae el Pi ligado al Ca ó P primario (Hedley *et al.*, 1982).

Turrión *et al.* (2000) mencionaron que el método más adecuado para predecir la disponibilidad de nutrientes en general, y de P en particular, es aquel que simula el funcionamiento de las raíces de las plantas. En tal sentido, Hedley *et al.* (1982) publicaron un método de fraccionamiento secuencial para el P edáfico que permite separar fracciones de P orgánicas e inorgánicas, de modo que tengan una relación directa con la toma de este elemento por las plantas.

En el fraccionamiento de Hedley, el Pi biológicamente disponible es extraído con una resina de intercambio iónico, seguido de un extractante poco fuerte NaHCO_3 0,5 M que se utiliza para extraer las formas orgánicas e inorgánicas lábiles. Las formas insolubles de P (fosfatos de Fe y Al, apatita, compuestos orgánicos e inorgánicos insolubles) son extraídas utilizando reactivos más fuertes tales, como el NaOH y el HCl .

Trasar-Cepeda *et al.* (1987) mencionaron que el fraccionamiento de Hedley aventaja al fraccionamiento de Chang y Jackson no sólo porque caracteriza tanto al Pi como al Po, sino también porque las fracciones que se establecen están relacionadas con la asimilación biológica de los fosfatos del suelo. Por otra parte, Cross y Schlesinger (1995) indicaron que el método de Hedley también puede ser utilizado para destacar la importancia de las fracciones orgánicas como fuentes de fósforo lábil, disponible para la planta.

El fraccionamiento de Tiessen y Moir (1993) se basa en el principio empleado por Hedley *et al.* (1982), con la diferencia que en lugar de utilizar resinas de intercambio iónico se utilizan membranas de intercambio iónico. Según, Turrión *et al.* (2007) en el método de Tiessen y Moir (1993) la diferenciación entre las fracciones la establece el grado de disponibilidad para ser absorbidas por las raíces de las plantas.

En el fraccionamiento de Tiessen y Moir (1993) se diferencian las siguientes fracciones:

- Fracción de P extraíble con membranas de intercambio aniónico (P-M), que se corresponde con la más lábil de todas las estudiadas y por lo tanto la más fácilmente asimilable por las plantas (Turrión *et al.*, 2007). Según, Hernández y Bautis (2005) esta fracción de P se corresponde con el P en solución.
- Fracción de P extraíble con NaHCO₃ ó P lábil (Pt-NaHCO₃), que es considerada por Hedley *et al.* (1982) y por Qualls y Richardson (1995) como la fracción rápidamente disponible para las plantas y rápidamente mineralizable. Esta fracción contiene tanto fósforo inorgánico (Pi-NaHCO₃) como orgánico (Po-NaHCO₃) lábiles adsorbidos en los minerales del suelo, junto con una pequeña cantidad de P microbiano. La fracción orgánica extraída con NaHCO₃ es una fracción altamente disponible; sin embargo, no es capaz de satisfacer la demanda de las raíces en un periodo corto de tiempo como la fracción inorgánica (Tiessen *et al.*, 1984). Según, Hernández y Bautis (2005) el Pi-NaHCO₃ es el P adsorbido al Fe y Al en la matriz de intercambio, mientras que el Po-NaHCO₃ es un Po de rápida mineralización.
- Fracción de P extraíble con NaOH (Pt-NaOH) que es considerada una forma secundaria de P y es la fracción predominante en suelos y horizontes evolucionados (Tiessen *et al.*, 1984). Qualls y Richardson (1995) denominaron esta fracción como no fácilmente asimilable que se encuentra ligada al Fe y al Al. La porción orgánica extraída con NaOH (Po-NaOH) supone una fracción más estable que la extraída con NaHCO₃ y, por lo tanto, se hace disponible en un plazo mayor. Esta fracción se identifica con los componentes orgánicos fuertemente unidos por sorción química a los óxidos de Fe y Al (Gil-Sotres *et al.*, 1990 y Tiessen y Moir, 1993). Por otra parte, Hernández y Bautis (2005) se refieren a esta fracción como el Pi y Po moderadamente disponible ó lábil asociado a fosfatos cristalinos o amorfos de Fe y Al.
- Fracción de P extraíble con HCl 1M (P-HCl), que se corresponde con el Pi ligado al Ca ó P primario y que está por lo tanto relacionado con la apatita (Hedley *et al.*, 1982).
- Fracción de P extraída con HCl concentrado, que es considerada por Fernández *et al.* (2001), como el Pi residual (Pi-R). El HCl concentrado extrae el P primario más fuertemente unido al Ca, que no se logra extraer con el HCl 1M. Hernández y Bautis (2005) señalaron esta fracción como Pi-ocluido o de los minerales primarios.
- Fracción de P extraída por digestión, Cross y Schlesinger (1995) y Fernández *et al.* (2000) la consideraron como el Po residual (Po-R). Dobermann *et al.* (2002) señalaron que esta fracción de P es la más recalcitrante de las formas orgánicas, mientras Hernández y Bautis (2005) señalaron esta fracción como el Po en la materia orgánica del suelo protegida por celulosa.

Para determinar la concentración de P en los extractos obtenidos, numerosos autores proponen el método colorimétrico descrito por Murphy y Riley (1962). Las ventajas del método con ascórbico sobre otros métodos colorimétricos son la estabilidad del color azul del complejo y la tolerancia a altas concentraciones de Fe (Kuo, 1996).

La terminología utilizada en el fraccionamiento de P se basa en el modelo conceptual (Figura 1) de las transformaciones de P en el suelo (Turrión *et al.*, 2002).

El objetivo de este trabajo es conocer la distribución del P proveniente de los fertilizantes superphosphertil, roca fosfórica con vinaza, roca fosfórica natural y superfosfato triple en dos suelos, comparando las dos metodologías de fraccionamiento más aplicadas en estudios de dinámica de P edáfico: fraccionamientos de Tiessen y Moir (1993) y de Olsen y Sommers (1982).

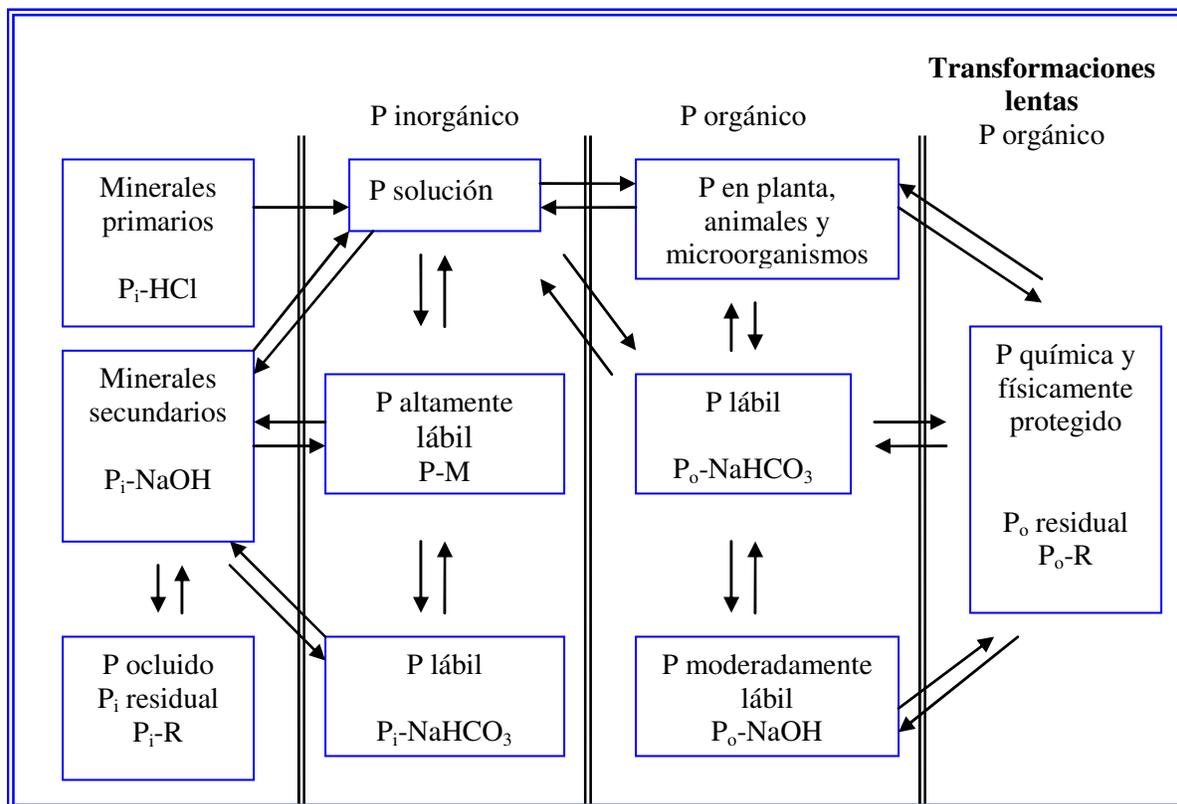


Figura 1. Modelo conceptual de las transformaciones del P en el suelo con los componentes para su determinación siguiendo el procedimiento secuencial de Tiessen y Moir (1993) modificado por Turrión *et al.*, (2002).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó la incubación del horizonte superior de un Ultisol de la localidad de Villa Nueva, Estado Lara y de un Alfisol de la localidad de Yaritagua, Estado Yaracuy (Venezuela) con cuatro fertilizantes fosfatados. El suelo de Villa Nueva fue clasificado como Typic Tropohumult, arcilloso, mixto, isotérmico (Rodríguez y Guedez, 1983) y el suelo Yaritagua como Oxic Haplustalf (Mendoza *et al.*, 1983).

Para caracterizar física y químicamente los suelos estudiados se realizaron los siguientes análisis: clase textural de acuerdo al sistema USDA; pH medido en H₂O con proporción suelo:agua 1:2; materia orgánica por digestión húmeda de Walkley y Black; P por Olsen; Al⁺³, K⁺, Ca⁺² y Mg⁺² intercambiables por extracción con acetato de amonio 1M pH 7,0, y Fe por extracción con dietileno-triamino-penta-acetato (DTPA), todos los cationes se determinaron por absorción atómica. Las metodologías analíticas seguidas se encuentran descritas en Gilabert *et al.* (1990) y Perkin-Elmer (1989). En el Cuadro 1 se muestran las características físicas y químicas de los primeros 30 cm de los suelos utilizados en la incubación.

Se utilizaron cuatro fuentes fosfatadas en dosis de 200 mg P·kg⁻¹, los fertilizantes fueron: superfosfertil (SFF), caracterizado por su mediana solubilidad (33 % P₂O₅ total y 21% P₂O₅ disponible); roca fosfórica de Riecito acidulada con vinaza (RFV) en proporción RF:V 1:1 (27,7 % P₂O₅ total y 6,5 % P₂O₅ disponible); roca fosfórica natural (RFN), extraída de las minas de Riecito en el Estado Falcón sin tratamiento químico (30 % P₂O₅ total, 4,2 % P₂O₅ disponible y 39% CaO) y superfosfato triple (SFT), fertilizante comercial con P fácilmente disponible (45 % P₂O₅ total, 45 % P₂O₅ disponible y 20 % CaO). También se evaluó un testigo sin fertilizante fosfatado (testigo, T).

Se pesaron 500 g de suelo seco al aire y tamizado por malla de 2 mm, una vez mezclado con su respectiva fuente de fósforo, el suelo fue incubado en recipientes de plástico con tapa, manteniendo la humedad del mismo cercana al 75 % de la capacidad de campo. El muestreo se realizó a las 3 semanas de la incubación. El diseño experimental fue un completamente aleatorizado con tres repeticiones.

Cuadro 1. Características físicas y químicas de los suelos Villa Nueva y Yaritagua utilizados en el experimento

Características	Villa Nueva	Yaritagua
Arena (%)	38	51
Limo (%)	26	23
Arcilla (%)	36	26
Clase textural	FA	FAa
pH (1:2)	4,2	6,3
CE (dSm ⁻¹)	0,04	0,24
MOS (%)	4	1,6
C total (%)	2,75	0,98
N total (%)	0,35	0,049
P _{Olsen} (mg·kg ⁻¹)	7,4	7,0
K ⁺ (mg·kg ⁻¹)	42	270
Ca ⁺² (mg·kg ⁻¹)	158	1287
Mg ⁺² (mg·kg ⁻¹)	31	93
Al ⁺³ (cmol·kg ⁻¹)	5	1,7
Fe _{DTPA} (mg·kg ⁻¹)	121	19

CE: conductividad eléctrica, MOS: materia orgánica edáfica, FA: franco arcilloso, FAa: franco arcillo arenoso, Al⁺³, K⁺, Ca⁺² Mg⁺² intercambiables medidos por extracción con acetato de amonio 1M pH 7,0, FeDTPA: Fe extraíble con dietilen-triamino-penta-acetato.

Las muestras tomadas fueron secadas al aire y tamizadas por malla de 2 mm, para posteriormente realizar el fraccionamiento del P por el método secuencial de Hedley *et al.* (1982), modificado por Tiessen y Moir (1993) y el de Chang y Jackson (1957) modificado por Olsen y Sommers (1982).

Con el procedimiento de Tiessen y Moir (1993) los extractantes empleados de forma secuencial fueron: Membrana de intercambio aniónico (P-M); NaHCO₃ 0,5 M pH 8,5 (P-NaHCO₃); NaOH 0,1 M (P-NaOH); HCl 1 M (P-HC); HCl concentrado 37 % (Pi-R) y la última fracción se obtuvo tras digestión con ácido perclórico para determinar el P orgánico residual (Po-R). En las extracciones alcalinas se realizó una posterior división entre el P orgánico (Po) y el inorgánico (Pi). El P total (Pt) se obtuvo por la sumatoria del P obtenido en todas las extracciones de este fraccionamiento. El procedimiento de extracción secuencial seguido para obtener las distintas fracciones de P por éste método se presenta en la Figura 2.

Con el procedimiento de Olsen y Sommers (1982) los extractantes empleados de forma secuencial fueron: NaOH 0,1 M + NaCl 0,1 M (P-AlFe); NaCl 1 M + citrato 0,3 M + NaHCO₃ 1M (P-CO₃); citrato 0,3 M + NaHCO₃ 1M + 1 g Na₂ S₂O₄ · 2H₂O (P- ocluido) y HCl 1M (P-Ca). El fósforo total extraído fue calculado por la sumatoria de las cuatro fracciones de P y fue representado como P_Σ. El procedimiento de extracción secuencial seguido para obtener las distintas fracciones de P por éste método se presenta en la Figura 3.

Para determinar la concentración de P en los extractos obtenidos se utilizó el método colorimétrico descrito por Murphy y Riley (1962), el cual se basa en la formación de un complejo coloreado al reducir con ácido ascórbico el compuesto formado por el molibdato y el ión fosfato presentes en el extracto. Para el desarrollo del color fue necesario ajustar el pH para lo que se utilizó el indicador paranitrofenol y la cantidad de ácido o base necesaria según el extractante utilizado en cada caso.

Para calcular el % de P recuperado por cada uno de los métodos se utilizó la siguiente fórmula:

$$PR = (P_{tm} - P_{tT}) * 100 / 200$$

Donde:

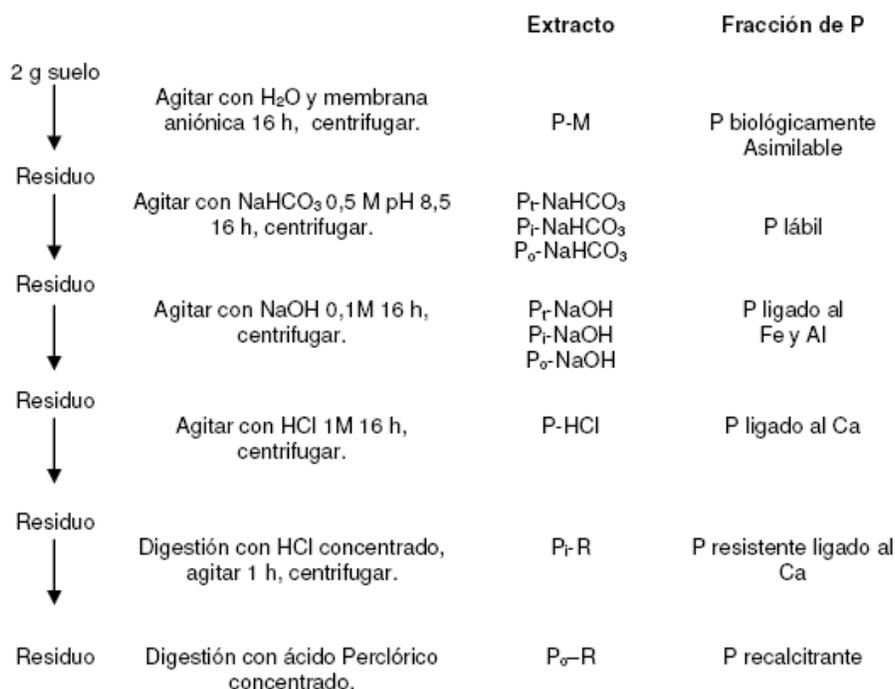
PR: % P recuperado

P_{tm}: mg P·kg⁻¹ total de cada una de las muestras

P_{tT}: mg P·kg⁻¹ total en el testigo sin fertilizar

200: dosis de P (mg·kg⁻¹) aplicada

A los datos obtenidos se les aplicó el análisis de la varianza (ANOVA) y la prueba de media de Tukey $P \leq 0,05$, comparándose los distintos tratamientos (T, SFF, RFV, RFN y SFT) para cada uno de los suelos. Para los análisis estadísticos se utilizó el paquete estadístico Statistix versión 8,0.



P-M: P extraído con la membrana de intercambio aniónico, P_T: P total, P_I: P inorgánico, P_O: P orgánico, P_I-R: P inorgánico residual, P_O-R: P orgánico residual.

Figura 2. Procedimiento secuencial para el fraccionamiento del P, según la metodología descrita por Tiessen y Moir (1993).

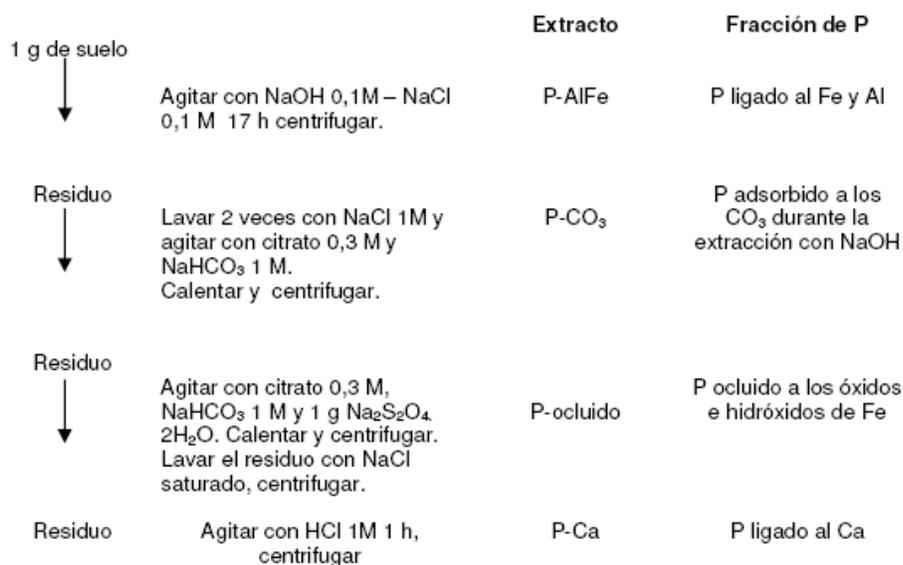


Figura 3. Procedimiento secuencial para el fraccionamiento del P, según la metodología descrita por Olsen y Sommers (1982).

RESULTADOS Y DISCUSION

Los resultados del fraccionamiento secuencial de P siguiendo el procedimiento de Tiessen y Moir (1993) para el suelo Villa Nueva (Ultisol) y Yaritagua (Alfisol) fertilizado con cuatro fuentes fosfatadas y un testigo se presentan en el cuadro 2.

Cuadro 2. Distribución de las fracciones del P edáfico en los suelos Villa Nueva y Yaritagua fertilizados con cuatro fuentes fosfatadas, después de tres semanas de incubación, fraccionamiento de Tiessen y Moir (1993).

Suelo	Trat.	(mg P·kg ⁻¹)								
		P-M	P _i -NaHCO ₃	P _o -NaHCO ₃	P _i -NaOH	P _o -NaOH	P-HCl	P _i -R	P _o -R	P _t
Villa Nueva	T	0,6 c	5 d	33 a	73 d	133 a	8 d	112 c	54	418 c
	SFF	2,2 b	19 b	31 a	148 b	134 a	85 b	129 b	54	603 a
	RFV	2,4 b	9 c	34 a	99 c	134 a	127 a	150 a	54	609 a
	RFN	2,1 b	10 c	32 a	109 c	137 a	130 a	154 a	54	628 a
	SFT	3,5 a	31 a	31 a	209 a	132 a	23 c	128 b	54	612 a
Yaritagua	T	2,5 c	6 c	4 a	12 c	25 a	19 d	78 c	29	177 b
	SFF	18,3 b	30 b	3 a	38 b	24 a	126 b	119 a	29	388 a
	RFV	1,9 c	6 c	5 a	13 c	24 a	182 a	121 a	29	384 a
	RFN	2,1 c	6 c	7 a	12 c	24 a	195 a	122 a	29	398 a
	SFT	34,1 a	46 a	9 a	50 a	27 a	71 c	100 b	29	365 a

En cada columna las letras distintas implican diferencias significativas en la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$), entre tratamientos dentro del mismo suelo. Trat: tratamiento; M: P extraído con membrana de intercambio; P-NaHCO₃: P extraído con NaHCO₃ 0,5 M; P-NaOH: P extraído con NaOH 0,1M; P-HCl: P extraído con HCl 1M; P_i-R y P_o-R: P inorgánico y orgánico residual, respectivamente; P_t: P total; T: Testigo; RFN: Roca fosfórica natural; RFV: Roca fosfórica con vinaza; SFF: Superfosfertil; SFT: Superfosfato triple.

En ambos suelos las primeras tres fracciones inorgánicas de P (P-M, P_i-NaHCO₃ y P_i-NaOH) fueron afectadas significativamente por la aplicación de los fertilizantes fosfatados estudiados en comparación con los testigos. En las tres fracciones indicadas los mayores valores se obtuvieron para el tratamiento con el fertilizante SFT, seguidas por el SFF (Cuadro 2). Buehler *et al.* (2002) señalaron que en suelos fertilizados el P es almacenado principalmente en esas tres fracciones, de donde la planta lo puede absorber.

Cabe destacar que en el suelo Villa Nueva la fracción inorgánica de P extraída con NaOH fue la que sufrió los mayores incrementos con la aplicación de fertilizantes fosfatados, en tal sentido, Dobermann *et al.* (2002) y Buehler *et al.* (2002) señalaron que la aplicación de fertilizantes sobre Ultisoles incrementa principalmente la fracción de P inorgánico asociado con el Al y el Fe. Fernández *et al.* (2001) observaron en la fracción P_i-NaOH mayor concentración en el suelo fertilizado, debido a los sucesivos aportes de P que se fijan con el Fe y el Al. Vázquez *et al.* (2007) explicaron que a medida que disminuye el pH y aumentan las condiciones de acidez mayor es la actividad de los (oxi) hidróxidos de Fe y Al que fijan al P.

Las porciones orgánicas de P extraídas con NaHCO₃ y con NaOH no respondieron a la aplicación de fertilizantes fosfatados, la fracción P_o-NaOH resultó la más abundante (Cuadro 2). Dobermann *et al.* (2002) señalaron que la aplicación de fertilizantes tiene poco impacto sobre las fracciones orgánicas.

Para ambos suelos, la fracción P-HCl mostró los más altos valores cuando se fertilizó con las fuentes de menor solubilidad RFV y RFN y los menores en el suelo testigo. Así mismo, Savini *et al.* (2006) observaron que la fracción de P inorgánico extraída con HCl no fue afectada cuando se fertilizó con SFT, pero incrementó con la aplicación de RF, ya que con el HCl se extrae el Pi ligado al Ca ó P primario, que está por tanto relacionado con el material inicial presente en la RFN y RFV.

En el suelo Yaritagua la fracción inorgánica de P extraída con HCl fue la que sufrió los mayores incrementos con la aplicación de fertilizantes fosfatados. Cross y Schlesinger (1995) señalaron que la fracción de P-HCl es más significativa en Alfisoles que en Ultisoles.

En los suelos Villa Nueva y Yaritagua, la aplicación de fertilizante fosfatado incrementó los valores de la fracción Pi-R en comparación al suelo testigo, debido a restos poco solubles provenientes de los fertilizantes fosfatados que quedaron como remanentes en el suelo, ya que todos provienen de la apatita. La alta estabilidad de la fracción Pi-R le resta importancia para la nutrición vegetal, razón por la cual esta fracción es poco considerada en los diferentes trabajos de investigación sobre fraccionamiento de P; sin embargo, en condiciones apropiadas de suelo y luego de cierto tiempo pudiera representar un aporte significativo para la nutrición de las plantas.

Finalmente, se observó que el Pt de los tratamientos fertilizados incremento significativamente con respecto al testigo. Por este procedimiento se recuperó en promedio para el suelo Villa Nueva el 97,6 % y para el suelo Yaritagua el 103,4 % del P añadido como fertilizante a los suelos (Cuadro 4).

Los resultados del fraccionamiento secuencial de P siguiendo el procedimiento de Olsen y Sommers (1982) para los suelos Villa Nueva (Ultisol) y Yaritagua (Alfisol) fertilizados con cuatro fuentes fosfatadas y un testigo se presentan en la Cuadro 2.

Cuadro 2. Distribución de las fracciones de P en el suelo Villa Nueva fertilizado con cuatro fuentes fosfatadas, después de tres semanas de incubación, fraccionamiento de Olsen y Sommers (1982).

Suelo	Tratamiento	P-AI _{Fe}	P-CO ₃	P-ocluido	P-Ca	P _T
		----- (mg P· kg ⁻¹) -----				
Villa Nueva	T	86 d	2 a	3 a	8 c	99 b
	SFF	195 b	3 a	8 a	68 b	274 a
	RFV	138 c	3 a	11 a	134 a	286 a
	RFN	128 c	7 a	9 a	147 a	290 a
	SFT	257 a	12 a	9 a	22 bc	300 a
Yaritagua	T	12 c	14 b	13 b	20 d	59 b
	SFF	38 b	42 ab	30 a	129 b	239 a
	RFV	18 c	22 ab	17 b	192 a	249 a
	RFN	14 c	12 b	16 b	183 a	225 a
	SFT	52 a	82 a	25 a	66 c	225 a

En cada columna las letras distintas implican diferencias significativas en la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$), entre tratamientos dentro del mismo suelo. Trat: tratamiento; M: P extraído con membrana de intercambio; P-NaHCO₃: P extraído con NaHCO₃ 0,5 M; P-NaOH: P extraído con NaOH 0,1M; P-HCl: P extraído con HCl 1M; Pi-R y Po-R: P inorgánico y orgánico residual, respectivamente; Pt: P total; T: Testigo; RFN: Roca fosfórica natural; RFV: Roca fosfórica con vinaza; SFF: Superphosphertil; SFT: Superfosfato triple.

La fracción de P-AI_{Fe} es la primera fracción obtenida por este método, en ambos suelos los mayores valores fueron observados cuando se fertilizó con la fuente de alta solubilidad (SFT) y los menores en el tratamiento testigo (T) (Cuadro 2).

Por el procedimiento de Olsen y Sommers (1982) la fracción de P-AI_{Fe} es equivalente a la fracción P_i-NaOH del procedimiento de Tiessen y Moir (1993). En el suelo de Villa Nueva, la fracción de P-AI_{Fe} fue la que sufrió los mayores incrementos con la aplicación de fertilizantes fosfatados, situación similar a la observada con el procedimiento de Tiessen y Moir (1993).

En el suelo de Villa Nueva las fracciones P-CO₃ y P-ocluido no respondieron estadísticamente a la aplicación de fertilizantes fosfatados. En el suelo de Yaritagua el SFT y el SFF para las fracciones anteriormente indicadas mostraron concentraciones significativamente mayores que el testigo. En el suelo Yaritagua parte del P proveniente de las fuentes solubles se adsorbe a los carbonatos, esta situación no puede observarse con el procedimiento de Tiessen y Moir (1993).

La fracción P-Ca obtenida por este procedimiento es equivalente a la fracción P-HCl del procedimiento de Tiessen y Moir (1993), en ambos suelos los valores mas altos fueron observados cuando se aplicó RFV y RFN (Cuadro 2). Para el suelo Yaritagua esta fracción sufrió los mayores incrementos con la aplicación de fertilizantes fosfatados, situación similar a la observada con el procedimiento de Tiessen y Moir (1993).

En ambos suelos se observó que todos los fertilizantes utilizados presentaron valores estadísticamente superiores de P total extraíble (P_{Σ}) que el suelo testigo, con este fraccionamiento se recuperó el 94,25 % y 87,75 % del P añadido en cada uno de los suelos respectivamente, resultando mayor la recuperación obtenida por el procedimiento de Tiessen y Moir (1993). Por otra parte, Olsen y Sommers (1982) señalaron que cuando el suelo reacciona con los extractantes, la solución de P después de la extracción no necesariamente refleja la cantidad total de P inorgánico solubilizado por estos reactivos, parte del P puede ser reabsorbido en la solución por otros componentes del suelo durante el curso de la extracción. Así mismo, señalaron estos autores que en suelos fuertemente fertilizados se producen ciertos compuestos de reacciones intermedias, cuya disolución y conducta de cambio en los solventes químicos es incierta.

Comparando ambos procedimientos se puede observar que en el procedimiento de Tiessen y Moir (1993) se diferenciaron seis fracciones dentro del reservorio total de P extraído del suelo. P-M, P-NaHCO₃, P-NaOH, P-HCl, P₁-R y P₆-R, en la segunda y tercera fracción se realizó además una posterior división entre las formas orgánicas y las inorgánicas. Mientras que con el procedimiento de Olsen y Sommers (1982) se diferenciaron solamente cuatro fracciones dentro del reservorio total de P extraído del suelo; P-AlFe, P-CO₃, P-ocluido y P-Ca. Con este procedimiento no se considera el P altamente lábil y lábil, fracciones afectadas significativamente por la aplicación de fertilizantes fosfatados de alta solubilidad, tampoco considera las formas orgánicas en ninguna de las fracciones que en el caso de enmiendas orgánicas podrían representar una fracción importante en la dinámica del P edáfico.

CONCLUSIONES

Las fertilizaciones fosfatadas estudiadas en este trabajo incrementaron sólo las fracciones inorgánicas del P edáfico, tanto en el Ultisol como en el Alfisol. Las fracciones fueron afectadas de forma diferente dependiendo del origen del fertilizante utilizado y del tipo de suelo. El Ultisol fijó una alta proporción del P adicionado, La fijación del P se evidenció con una menor concentración de P en las fracciones más lábiles (P-M y P-NaHCO₃) y una mayor concentración en la fracción ligada al Fe y al Al cuando se fertilizó con la fuente de alta solubilidad SFT. La alta fijación que presentó ocurrió como consecuencia de las altas concentraciones de Fe y Al.

El procedimiento de Tiessen y Moir (1993) permite realizar un estudio más detallado de la distribución del P de los fertilizantes una vez en el suelo, ya que incluye, a diferencia del de Olsen y Sommers (1982), las fracciones P-M y P-NaHCO₃ que están entre las más afectadas por la fertilización fosfatada, además diferencia fracciones orgánicas del P que en el caso de enmiendas orgánicas podrían representar una fracción importante en la dinámica del P edáfico.

LITERATURA CITADA

- Buehler, S.; Oberson, A.; Rao, I.; Friesen, D. y Frossard, E.** 2002. Sequential phosphorus extraction of a ³³P-labeled *Oxisol* under contrasting agricultural systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 868-877.
- Chang, S. y Jackson, M.** 1957. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Sci.* 125: 49-94.
- Cross, A. y Schlesinger, W.** 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.
- Dobermann, A.; George, T. y Thevs, N.** 2002. Phosphorus fertilizer effects on soil phosphorus pools in acid upland soils. *Soil Sci. Am. J.* 66: 652-660.
- Fernández, C.; Vázquez, S. y Dalurzo, H.** 2000. Fracciones de fósforo y su relación taxonómica con suelos tropicales. Documento en línea. Disponible en: <http://www.unne.edu.ar/Web/cyt/cyt/2001/5-Agrarias/A-074.pdf>. Consulta: 2006, Febrero 20.
- Fernández, C.; Vázquez, S. y Dalurzo, H.** 2001. Fraccionamiento del fósforo en suelos con pastura, producción citrícola y arrocería. Documento en línea. Disponible en: <http://www1.unne.edu.ar/Web/cyt/2002/05-Agrarias/A-013.pdf>. Consulta: 2006, Febrero 20.
- Gilabert, J.; López, I. y Pérez, R.** 1990. Análisis de suelos para diagnóstico de fertilidad. Manual de métodos y procedimientos de referencia. FONAIAP. Serie D. N° 26. Maracay, Venezuela. 198 pp.

- Gil-Sotres, F.; Zech, W. y Alt, H.** 1990. Characterization of phosphorus fractions in surface horizons of soil from Galicia (Spain) by ^{31}P -NMR spectroscopy. *Soil Biol. Biochem.* 22: 75-79.
- Hedley, M.; Stewart, J. y Chauhan, B.** 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and laboratory incubations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 970-976.
- Hernández, I. y Bautis, M.** 2005. Cambios en el contenido de fósforo en el suelo superficial por la conversión de sabanas en pinares. *Bioagro.* 17(2): 69-78.
- Holford, I.** 1980. Greenhouse evaluation of four phosphorus soil test relation to phosphate buffering and labile phosphate in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 555-559.
- Kuo, S.** 1996. Phosphorus. En: *Methods of Soil Analysis. Part III. Chemical Methods.* Sparks, D.L. (Ed). Madison, USA. Pp 869-919.
- Mendoza, S.; Valera, G. y Ohep, C.** 1983. Estudio de suelos preliminar del eje Morón-Barquisimeto-La Lucía. Estado Falcón, Carabobo, Yaracuy y Lara. MARNR. Barquisimeto, Venezuela. Pp. 90-91.
- Murphy, J. y Riley, J.** 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal Chem. Acta*, 27: 31-36.
- Olsen, S. y Sommers, L.** 1982. Phosphorus. En: *Methods of soil analysis. Part 2 Chemical and Microbiological properties.* Page A.L. Miller R.M., Keeney D.R. (Ed). Madison, W.I., USA. Pp 403-430.
- Olsen, S.; Cole, C.; Watanabe, F. y Dean, L.** 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. USDA. Circular 939. Washington, USA. Pp 144-149.
- Perkin-Elmer.** 1989. Analytical methods for atomic absorption spectrophotometry. The Perkin Elmer Corporation. Norwalk Connecticut, USA. 435 pp.
- Qualls, R. y Richardson, C.** 1995. Forms of soil phosphorus along a nutrient enrichment gradient in the northern everglades. *Soil Sci.* 16: 183-198.
- Rodríguez, O. y Guedes, J.** 1983. Mineralogía, génesis y propiedades químicas de un suelo bajo cultivo de café en Villa Nueva, Estado Lara. UCLA. Barquisimeto, Venezuela. 22 pp.
- Savini, I.; Smithson, P.; Karanja, K. y Yamasaki, H.** 2006. Influence of *Tithonia diversifolia* and triple superphosphate on dissolution and effectiveness of phosphate rock in acidic soil. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 169:593-604.
- Tiessen, H. y Moir, J.** 1993. Characterization of available P by sequential extraction. En: *Soil sampling and Methods of analysis.* Carter, M.R. (Ed). Boca Raton. USA. Lewis publishers. Pp 75-86.
- Tiessen, H.; Stewart, J. y Cole, C.** 1984. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 853-858.
- Torrent, C.** 1994. Iron oxides in Mediterranean soils: Properties and influences on soil behavior. XV Congreso Mundial de la Ciencia del Suelo. Acapulco, México. Pp 212-215.
- Trasar-Cepeda, M.; Gil-Sotres, F. y Gutian, F.** 1987. Cantidades y formas de fósforo en suelos naturales de Galicia (NW Spain). *Anal Edaf. Agrobiol.* 46: 1361-1373.
- Turrión, M-B.; Gallardo, J. y González, M.** 2000. Distribution of P forms in natural and fertilized forest soils of the central Western Spain: Plant response to superphosphate fertilization. *Arid Soil Research and Rehabilitation.* 14: 159-173.
- Turrión, M-B.; Gallardo, J. Y González, M.** 2002. Relationships between organic and inorganic P fractions with soil Fe and Al forms in forest soils of Sierra de Gata mountains (Western Spain). En: *Developments in Soil Science.* Pp 297-310.
- Turrión, M-B.; López, O.; Lafuente F.; Mulas, R.; Ruipérez, C. y Puyo, A.** 2007. Soil phosphorus forms as quality indicators of soils under different vegetation covers. *Sci. Total Environ.* 36: 399-207.
- Vázquez, S.; Fernández, C. y Dalurzo, H.** 2007. Parámetros de suelo relacionados a las fracciones de fósforo en *Alfisoles*, *Ultisoles* y *Oxisoles* (Argentina). Memorias del XVII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. León Guanajuato, México. Pp 365-367.