

ADICIÓN DE ROCA FOSFÓRICA Y CAMBIOS EN LAS FRACCIONES DE P EN SUELOS CON DIFERENTE HUMEDAD Y PERÍODOS DE INCUBACIÓN

Danilo López-Hernández¹ y Gerardo Romero¹

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue comparar la disolución de la roca fosfórica (RF) Monte Fresco en dos suelos ácidos muy contrastantes en características físico-químicas, mediante un esquema de fraccionamiento a diferentes períodos de incubación y contenidos de humedad. El suelo Iguana es muy arenoso, de baja fertilidad natural y baja capacidad de retención de fosfatos, mientras que el suelo Bramón es mucho más ácido y mayor contenido de Al cambiante pero con mayor fertilidad natural y alta capacidad de retención de fosfatos. En el suelo Iguana la RF se disolvió en una mayor proporción que en el suelo Bramón, ya que este suelo, a pesar de su fuerte acidez presentó altos niveles de P (total y disponible) y Ca intercambiable los cuales generaron condiciones menos apropiadas para la reacción de la RF. A lo largo de la incubación con RF, como resultado de la redistribución de las fracciones mayores de P (P-HCl y P-residual) originalmente presentes en la RF, ocurrió un incremento significativo para la fracciones P-resina y P-microbiano en el suelo Iguana, y de P-resina, P-microbiano, NaOH-Pi y Po en el suelo Bramón, en este caso, posiblemente asociado con sus mayores niveles de C. Un mayor contenido de humedad disminuyó los valores de las fracciones más lábiles (resina y NaHCO_3) en ambos suelos, lo que implica, una mayor adsorción del P al establecerse un mayor contacto entre las superficies adsorbentes y el fósforo recién liberado de la roca fosfórica.

Palabras clave adicionales: Adsorción de P, biomasa microbiana, fraccionamiento de P, suelos ácidos

ABSTRACT

Changes in soil P-fractions by the addition of phosphoric rock at different incubation times and moisture contents

The objective of this study was to compare the dissolution of the phosphate rock (PR) Monte Fresco in two acidic soils very contrasting in physicochemical characteristics, through a scheme of fractionation at different periods of incubation and moisture contents. Iguana, a very sandy soil with a low natural fertility and low phosphate retention; and much more acid Bramón soil with a higher exchangeable Al content but with greater natural fertility and high capacity of phosphate retention. Iguana soil dissolved the PR in a greater proportion than the soil Bramón, since this soil, despite its strong acidity presented high levels of P (total and available) and exchangeable Ca which generated less appropriate conditions for the reaction of the PR. During incubation with PR, as a result of the redistribution of the major fractions of P (P-HCl and P-residual) originally present in the PR, occurred a significant increase for the P-resin and microbial-P fractions in Iguana soil; and in P-resin, microbial-P, NaOH-Pi and Po for Bramón soil, in this case, possibly associated with its higher C content. Higher moisture contents decreased more labile P-fractions (resin and NaHCO_3) values in both soils, which implies, a higher adsorption of P due to a greater contact between the adsorbent surfaces and newly released P from the PR.

Additional key words: Acid soils, microbial biomass, P-adsorption, P-fractionation

INTRODUCCIÓN

Una alta proporción de los suelos venezolanos son ácidos, muy meteorizados y de una baja fertilidad natural, de manera que para poder ser utilizados en actividades agrícolas necesitan ser abonados con cantidades sustanciales de fertilizantes. En ambientes tropicales altamente

meteorizados, el fósforo en particular se presenta como elemento esencial limitante a la producción vegetal y animal, a objeto de contrarrestar ese déficit se acostumbra fertilizar con fuentes solubles e insolubles de P inorgánico (Casanova, 2007; Sequera y Ramírez, 2013) o donde las condiciones son favorables, mediante el uso de abonos orgánicos (López et al., 2007; Brossard et

Recibido: Abril 29, 2018

Aceptado: Diciembre 6, 2018

¹ Instituto de Zoología y Ecología Tropical, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela. Apdo. 47058. Caracas. Venezuela. e-mail: danilo.lopez@ciens.ucv.ve

al., 2015).

Cuando un abono fosforado se añade al suelo, el P interviene en una serie de reacciones entre las que destacan la adsorción-desorción a la fracción inorgánica del suelo (López, 2016), estas reacciones, controladas por las propiedades físicas y químicas del suelo determinan, en buena proporción, los niveles de P aprovechable a los cultivos, ya que es un hecho bien establecido, que un alto porcentaje del P añadido como fertilizante se fija de manera casi irreversible al suelo y no es aprovechable (López, 1977; Pinto et al., 2013). Sin embargo, los procesos fisicoquímicos de adsorción-desorción están interrelacionados con procesos de naturaleza biológica como la mineralización, y las actividades enzimáticas (Kellogg et al., 2006) de manera que el P en el suelo se presenta, en formas orgánicas e inorgánicas (adsorbida o precipitada) en estrecha asociación con la biomasa microbiana y la solución o agua del suelo.

A partir del método clásico de Chang y Jackson se han usado los esquemas de fraccionamiento para poder caracterizar mejor las formas de P del suelo; dentro de estos esquemas en los últimos 30 años particular aceptación ha obtenido por la adecuada discriminación que hace de las formas orgánicas e inorgánicas de P, el método de Hedley et al. (1982); la principal premisa de este esquema de fraccionamiento se basa en extraer primero las fracciones de P más disponibles, o potencialmente disponibles (mineralizables), con extractantes suaves (bases débiles y resinas), posteriormente las fracciones no disponibles y recalcitrantes se extraen con ácidos y bases fuertes (López et al., 2007; Nyambati y Opala, 2014).

Una de las bondades de los esquemas de fraccionamientos es que permiten ubicar hacia que compartimiento se dirige el P una vez que es añadido, provenga este, bien de una fuente soluble, de un abono orgánico o de la roca fosfórica, lo que a su vez depende de las características intrínsecas del suelo.

En Venezuela han sido de uso generalizado como fertilizantes fosforados el superfosfato triple y el fosfato diamónico; aunque ante el descubrimiento en varias zonas del país de importantes reservas de roca fosfóricas (RF), estas empezaron a utilizarse directamente o en la preparación de abonos a fin de ir sustituyendo las

importaciones de fertilizantes fosforados solubles (Casanova, 2007). Dentro de este contexto reviste particular interés la evaluación del comportamiento de suelos ante la RF Monte Fresco, ubicada en el estado Táchira, Venezuela, debido a la importancia de sus reservas probadas y su potencialidad para ser usada bajo tratamientos adecuados como fuente de fertilizantes fosforados solubles. La RF Monte Fresco tiene un contenido alto de P_2O_5 (37 %) en el sustrato superior (Casanova y Elizalde, 1988).

Las rocas fosfóricas necesitan para su disolución un ambiente particularmente ácido, ya que a pH por encima de 5,6 su disolución es casi nula, pero además de la acidez, existe un conjunto de propiedades de los suelos que favorecen su reactividad: así, bajos niveles de calcio (baja saturación de calcio) y de fosfatos en solución igualmente favorecen su solubilización (Morillo et al., 2007; Zapata y Roy, 2007), por otra parte una alta capacidad de retención de fosfato que podrían estar asociados a niveles relativamente altos en Al intercambiable y bajos pH inducen la solubilización de las RF.

Así, es posible, que suelos ácidos que difieren sustancialmente en las propiedades arriba mencionadas disuelvan la RF en tasas muy contrastantes, de la misma manera la redistribución del P solubilizado de la RF en las diferentes fracciones de P debe ocurrir atendiendo a las características particulares de cada suelo, igualmente, es de esperar, que esta disolución sea afectada por el contenido de humedad del suelo, aunque son pocos los reportes en la literatura sobre este tema (Kanabo y Gilkes 1988; He et al., 2005; Fayiga y Obigbesan, 2018).

En esta contribución se comparan dos suelos ácidos venezolanos muy contrastantes en características físico-químicas asociadas al proceso de disolución de la roca fosfórica: pH, contenido de carbono orgánico, aluminio intercambiable, calcio intercambiable, fósforo total y disponible, capacidad de adsorción de P y capacidad de intercambio catiónico (CIC). La experimentación incluyó dos ensayos de incubación cuyo objetivo fue cuantificar para los suelos escogidos la solubilidad de la roca fosfórica Monte Fresco y determinar la distribución del P en las diferentes fracciones orgánicas e inorgánicas ante diferentes contenidos de humedad y periodos de incubación de los suelos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para los experimentos se utilizó un Entisol arenoso correspondiente al suelo Iguana (Ustoxic Quartzipsamment) y un Ultisol muy ácido representado por la serie Bramón (Typic Tropudult), estos suelos presentaban características físico-químicas ligadas al proceso de disolución de la roca fosfórica bien contrastantes (Cuadro 1). Para la caracterización física y química las muestras de suelos se secaron al aire y luego fueron tamizadas para obtener agregados menores a 2 mm. Los análisis rutinarios de los suelos se realizaron siguiendo los protocolos utilizados en el INIA, Maracay (Gilabert et al., 1990). La capacidad de adsorción de P se determinó mediante el índice de adsorción propuesto por Bache y Williams y empleado por López (2016) y Romero y López (2018), el P disponible fue extraído por el método Bray I y el P en solución se determinó de acuerdo al método colorimétrico clásico de Murphy y Riley. El análisis mineralógico fue realizado utilizando la técnica de difracción de rayos X en láminas preparadas con la fracción arcilla.

Disolución de la RF en los suelos. Los suelos fueron fertilizados con 300 mg P por kg de RF Monte Fresco y se procedió a incubarlos por triplicado en frascos de vidrio a alto contenido de humedad aprovechable y a una temperatura aproximada de 25 °C por 30 días. Una vez terminada la incubación, las muestras tratadas fueron extraídas con el reactivo Bray I y con resinas de intercambio aniónico (Hedley et al., 1982); el P en solución fue determinado de acuerdo al método de Murphy y Riley. El mismo procedimiento se realizó a muestras triplicadas de los suelos sin fertilizar (control). La diferencia entre el nivel de P extraído del suelo tratado y el control correspondió al P disuelto (ΔP) de la RF Monte Fresco de acuerdo a Romero y López (2018).

Cambios en las fracciones de fósforo en función del tiempo de incubación y del contenido de humedad. Muestras triplicadas de los suelos escogidos fueron fertilizadas con dosis de 300 mg P por kg de RF Monte Fresco y se incubaron en frascos de vidrio a bajos (30 %) y altos (100 %) contenidos de humedad aprovechable y a una temperatura aproximada de 25° C por 3, 15 y 30 días. Al final de cada periodo de incubación a los

suelos se les realizó un fraccionamiento modificado de Hedley et al. (1982); la modificación consistió en utilizar hexanol en lugar de cloroformo para evitar sus propiedades tóxicas (López y Niño, 1993), igualmente se eliminó el paso de disgregación por sonido. El fósforo extraído en las diferentes fracciones fue medido por el método de Murphy y Riley.

Se realizaron análisis de varianza y comparación de medias entre tratamientos por la prueba de Duncan mediante el sistema de análisis estadístico Sanest.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de los suelos y su relación con la disolución de la roca fosfórica. Los suelos utilizados, un Entisol, Iguana (Ustoxic Quartzipsamment) y un Ultisol, Bramón (Typic Tropudult) presentaron características físico-químicas muy diferentes (Cuadro 1). El suelo Bramón caracterizado por ser muy ácido (pH 4,1) y con un nivel importante de aluminio cambiante (Cuadro 1) que se reflejó en su mayor capacidad para retener P (López y Burnham, 1974; López, 2016). Por otro lado, el suelo Iguana es prácticamente una arena de ahí sus bajos niveles de fertilidad natural (carbono orgánico, capacidad de intercambio catiónico y bases cambiables) y muy baja capacidad de retención de fosfatos.

Sería de esperar una mayor disolución de la RF en el suelo Bramón respecto al suelo Iguana debido a su muy bajo pH y mayor adsorción de P asociada a un alto contenido de aluminio intercambiable; sin embargo, tal situación no fue corroborada por ninguno de los métodos ensayados ya que la solubilidad del suelo Iguana fue muy superior al suelo Bramón (Cuadro 2). La discrepancia obedece a que el suelo Bramón presentó además altos niveles de P total, P disponible y Ca intercambiable, condiciones menos apropiadas para la reacción de la RF (Morillo et al., 2007; Zapata y Roy, 2007). Por el contrario, para el suelo Iguana, con valores bajos de pH, bajos contenidos de Ca intercambiable, P total y P disponible, se dieron las condiciones para una amplia disolución de la RF, la cual alcanzó un valor 19 veces superior al reportado para el Ultisol de Bramón en el caso de la medición con el método Bray I, y 1,8 veces superior cuando la

disolución se midió con el método de la resina de intercambio (Cuadro 2), la baja capacidad de adsorción de P del suelo Iguana asegura que el P una vez solubilizado de la RF permanezca en

solución sin ser retenido como es el caso del suelo Bramón, El muy alto valor de P extraído del suelo Bramón por el reactivo Bray I se corresponde con su altos de P total y fertilidad natural.

Cuadro 1. Características físicas y químicas de los suelos analizados

Suelo	Iguana	Bramón
Clasificación	Ustoxic Quartzipsamment	Typic Tropudult
Textura	a	FA
Humedad a capacidad de campo (%)	2	20
pH	5,5	4,1
Carbono orgánico (%)	0,30	1,85
P total (mg·kg ⁻¹)	163	468
P Bray (mg·kg ⁻¹)	1,8	15,2
Índice adsorción de P	5,7	23,6
Ca ⁺ (cmol·kg ⁻¹)	0,25	2,50
Mg ⁺ (cmol·kg ⁻¹)	0,22	1,22
Na ⁺ (cmol·kg ⁻¹)	0,19	0,33
K ⁺ (cmol·kg ⁻¹)	0,23	0,23
H ⁺ (cmol·kg ⁻¹)	0,1	0,9
Al ³⁺ (cmol·kg ⁻¹)	0,1	0,8
CIC (cmol·kg ⁻¹)	1,2	6,6
Acidez total (cmol·kg ⁻¹)	0,2	1,7

Índice de adsorción de P = $x / \log C$, donde x: mg P por 100 g suelo, C: $\mu\text{mol P por L}$

Cuadro 2. Valores de P (mg·kg⁻¹) de suelos incubados y extraídos con la solución Bray I y resinas aniónicas Dowex. La diferencia entre el nivel de P extraído del suelo tratado y el control corresponde al P disuelto (ΔP) de la RF

Extractante	Suelos	Iguana	Bramón
Bray I	Control	1,0 a	17,5 a
	RF	30,0 b	19,0 a
	ΔP	29,0	1,5
Resina aniónica	Control	0,8 a	2,2 a
	RF	45,0 b	27,0 b
	ΔP	44,2	24,8

Valores con letras diferentes entre los suelos fertilizados y no fertilizados difieren significativamente según la prueba de Duncan ($P \leq 0,05$)

Cambios en las fracciones de P por la aplicación de la RF. La distribución de las fracciones de P en el suelo arenoso Iguana sin fertilizar (control) reflejó una escasa presencia de P en formas solubles extraíbles con resina y con bicarbonato, igual situación se presentó en el caso del P combinado con calcio (P-HCl) y el extraíble con NaOH, por lo que la mayor parte del fósforo se encontró asociada a la fracción residual

(Cuadro 3) y de ahí la escasa disponibilidad de P de este suelo; resultados similares han sido presentados para otros Entisoles de sabanas venezolanas, ubicadas en Uverito (Hernández y Bautis, 2005) y Puerto Ayacucho (López et al., 2007). Por el contrario, El suelo Bramón a pesar de su fuerte acidez presentó un alto contenido de P total y materia orgánica, de manera que los niveles de P disponible fueron altos, particularmente, el P extraíble con bicarbonato (Cuadro 3), la mayor proporción de P en este suelo se alojó en la fracción residual lo que sugiere un predominio de compuestos inorgánicos insolubles y formas estables de compuestos orgánicos (Hedley et al., 1982; Rivaie et al., 2008); sin embargo, debido a los altos niveles de P total y cantidades significativas de Ca intercambiable (Cuadro 1) en el suelo Bramón se encontraron niveles moderados de fósforo de P-Ca asociados al apatito y extraíbles con HCl.

La aplicación de la RF al suelo Iguana después de 30 días de incubación modificó todas las fracciones de P (Cuadro 3), estos aumentos fueron sustanciales en el caso del P-HCl, resina y residual, lo que indicó claramente un proceso de disolución de la RF dirigiéndose el P liberado de

la RF hacia esas fracciones, igualmente hubo un incremento importante en el P-microbiano y el Pi extraíble con NaOH, mientras que el Po-NaOH no fue afectado por la adición de RF. Información similar ha sido previamente presentada para experimentos con fraccionamiento y RF (Rivaie, et al., 2008).

En el caso del suelo Bramón, el P incorporado de la RF también modificó todas las fracciones de P, el mayor incremento se dirigió principalmente a las fracciones P-resina, microbiano, P-HCl (ligada al apatito) y Pi NaOH, mientras que para el Po NaOH ocurrió un aumento moderado, las fracciones P-residual y P-NaHCO₃ también fueron moderadamente afectadas con el tratamiento de RF.

Cuadro 3. Fracciones de P (mg·kg⁻¹) en suelos ácidos sin fertilizar y fertilizados con RF (método de Hedley et al., 1982)

Fracción	Iguana		Bramón	
	Sin RF	Con RF	Sin RF	Con RF
P-Resina	0,0 a	44,2 b	2,6 a	36,4 b
P-NaHCO ₃	2,4 a	3,4 a	20,3 a	26,1 b
P-Microbiano	0,4 a	7,7 b	1,1 a	70,0 b
Pi-NaOH	3,0 a	6,6 b	41,1 a	94,4 b
Po-NaOH	1,2 a	2,0 a	42,2 a	49,8 b
P-HCl	0,0 a	172,0 b	11,9 a	122,5 b
P Residual	96,8 a	150,6 b	343,4 a	357,8 b
P Total	103,6 a	386,5 b	462,6 a	757,0 b

Valores con letras diferentes entre los suelos fertilizados y no fertilizados difieren significativamente según la prueba de Duncan ($P \leq 0,05$)

Cambios en las fracciones de P en función del tiempo de incubación y el contenido de humedad. A medida que ocurrió el proceso de incubación en los suelos ensayados se presentó una redistribución del P en las diferentes fracciones, como es de esperar, el fósforo, una vez liberado de la roca puede ser rápidamente retenido (adsorbido o precipitado) por la matriz adsorbente y no mantenerse en solución (López, 1977; MacKay y Syers, 1986; López, 2016), este proceso pudo ser afectado por el contenido de humedad del sistema ya que la tasa de disolución de la RF es a su vez controlada por la difusión de los iones H₂PO₄⁻¹ y Ca²⁺ que se disolvieron de la roca. En un sistema de incubación, en donde no se incluyan plantas, como el que acá se presenta; sin embargo, el P

solubilizado de la RF también pudo pasar a formar parte de los microorganismos (hongos y bacterias) del suelo mediante la inmovilización biológica, proceso también susceptible a ser afectado por el contenido de humedad del ambiente (Rangel et al., 2015).

Fracciones de P en función del tiempo de incubación. La RF por ser un fertilizante no soluble presenta la mayor parte del P en las fracciones HCl y residual y a medida que va ocurriendo su disolución va enriqueciendo los grupos más disponibles del suelo.

En el suelo Iguana las fracciones más disponibles de P (P-resina y P-NaHCO₃) tuvieron un incremento significativo en los primeros 15 días de incubación, mientras que el P-microbiano y el Pi-NaOH no sufrieron mayor modificación, al contrario el Po-NaOH disminuyó significativamente en ese periodo (Figura 1a); mientras que para la fracción P-HCl el incremento fue muy drástico, esta redistribución ocurrió a expensas de P-residual cuyo contenido sufrió una baja considerable en el período de 3 a 15 días (Figura 1b). Prosiguiendo la incubación (período de 15 a 30 días), la fracción de P más disponible (P-resina) permaneció con valores altos; sin embargo el P-NaHCO₃ disminuyó sustancialmente, al contrario el P-microbiano tuvo un aumento significativo mientras que las fracciones extraídas con NaOH no mostraron mayores cambios (Figura 2a). Para las fracciones más recalcitrantes, P-residual y P-HCl se presentaron menores cambios entre 15 a 30 días (Figura 2b) lo que indica que la mayor disolución de la RF ocurrió en los primeros 15 días.

Para el suelo Bramón, en general, se registró una tendencia a incrementar los valores de P a lo largo de todo el período de incubación en las fracciones P-resina, Pi y Po-NaOH y P-microbiano (Figura 2a), esta última fracción presentó a los 30 días valores bastante altos (70 µg·g⁻¹ P), muy posiblemente relacionados a una intensa actividad microbiana asociada al alto contenido de C (Ravindran y Yang, 2015) y a la adecuada disponibilidad de nutrientes (Ca y Mg) existentes en ese suelo (Cuadro 1). Al igual que para el suelo Iguana, la redistribución de P en sus diferentes formas para el suelo Bramón está dirigida por el P presente en el apatito de la roca fosfórica (P-HCl) y los concomitantes cambios en el P-residual (Figura 2b).

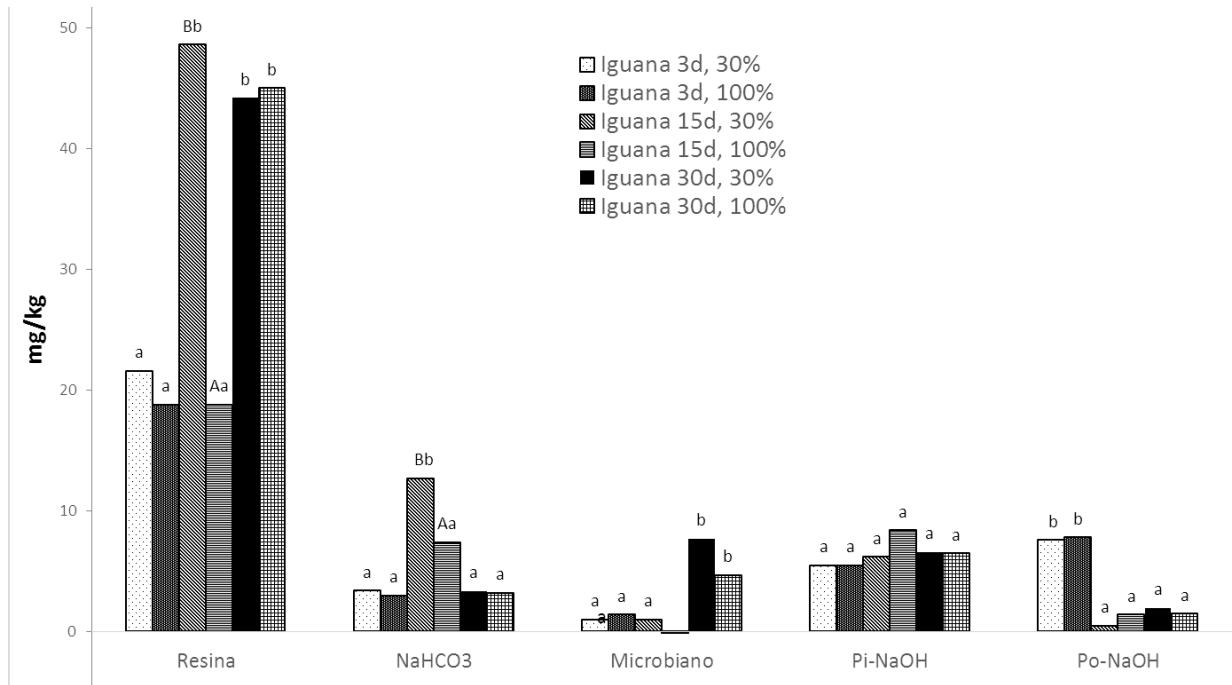


Figura 1a. Efecto del contenido de humedad y del tiempo de incubación sobre las fracciones más disponibles de P en el suelo Iguana. Columnas con letras diferentes difieren significativamente según la prueba de Duncan ($P \leq 0,05$). Letras minúsculas para el tiempo de incubación y mayúsculas para el contenido de humedad

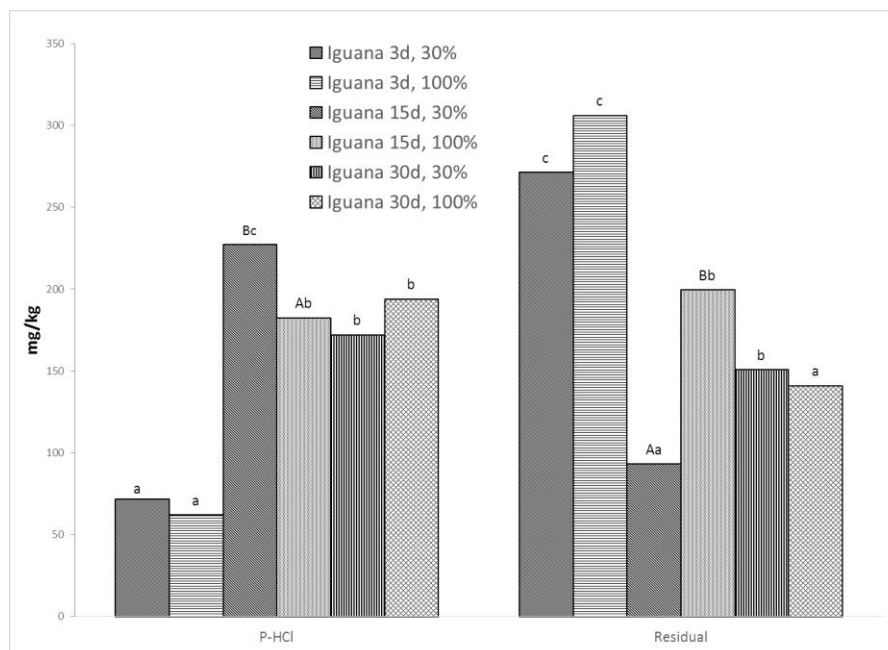


Figura 1b. Efecto del contenido de humedad y del tiempo de incubación sobre las fracciones recalcitrantes de P en el suelo Iguana. Columnas con letras diferentes difieren significativamente según la prueba de Duncan ($P \leq 0,05$). Letras minúsculas para el tiempo de incubación y mayúsculas para el contenido de humedad

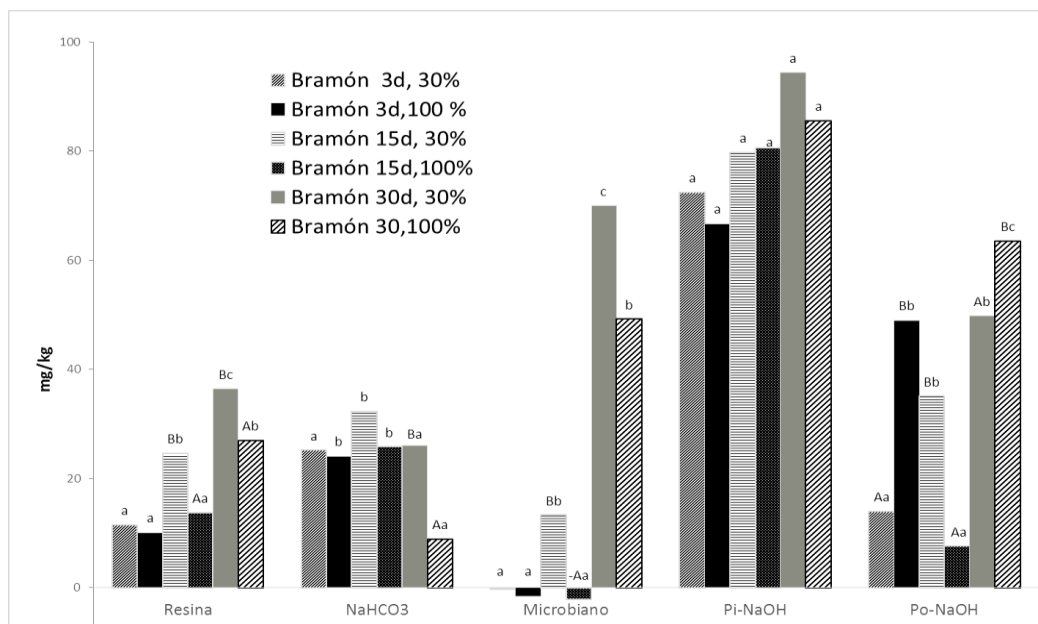


Figura 2a. Efecto del contenido de humedad y del tiempo de incubación sobre las fracciones más disponibles de P en el suelo Bramón. Columnas con letras diferentes difieren significativamente según la prueba de Duncan ($P \leq 0,05$). Letras minúsculas para el tiempo de incubación y mayúsculas para el contenido de humedad

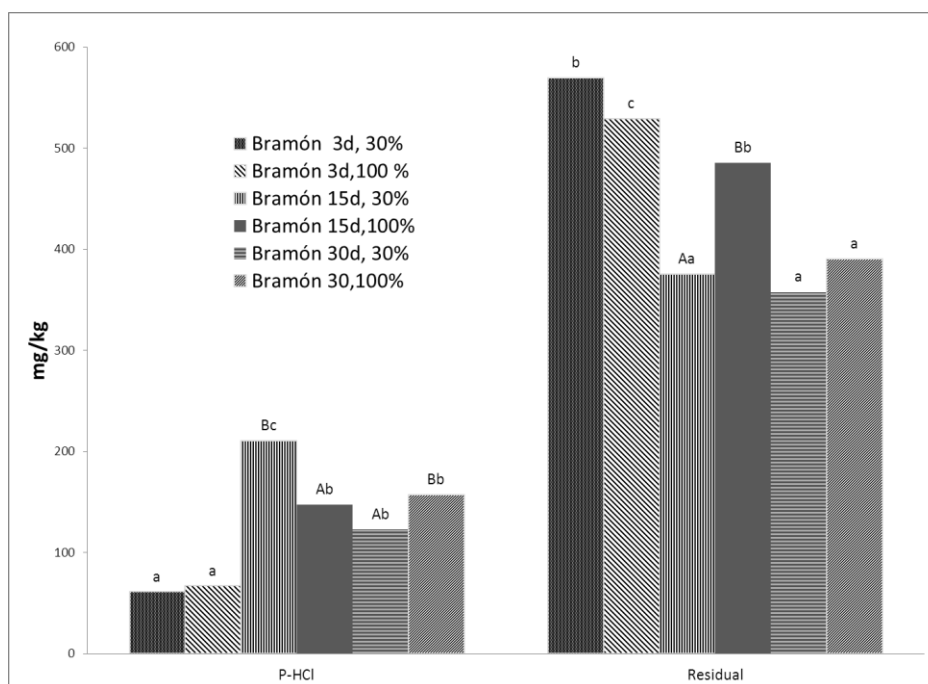


Figura 2b. Efecto del contenido de humedad y del tiempo de incubación sobre las fracciones recalcitrantes de P en el suelo Bramón. Columnas con letras diferentes difieren significativamente según la prueba de Duncan ($P \leq 0,05$). Letras minúsculas para el tiempo de incubación y mayúsculas para el contenido de humedad

Fracciones de P en función del contenido de humedad. En lo que concierne al efecto del

contenido de humedad sobre la redistribución de las fracciones de P; en el caso del suelo Iguana, el

contenido de humedad afectó solamente a los 15 días de incubación las fracciones más lábiles (P-resina y P-NaHCO₃) ya que se encontró una disminución significativa en los suelos incubados con mayor contenido de humedad (Figura 1a). Para las fracciones menos disponibles igualmente hubo una caída a los 15 días de incubación para el P-HCl en los suelos sometidos a mayor contenido de humedad (Figura 1b), mientras que el P-residual incrementó a mayor contenido de humedad en el periodo de 3 a 15 días; al final de la incubación el porcentaje de humedad no afectó mayormente el contenido de P-residual (Figura 3b).

El efecto del contenido de humedad sobre la redistribución del P en las diferentes fracciones fue más evidente para el suelo Bramón. Hay una tendencia en las fracciones más disponibles (P-resina, P-NaHCO₃ y P-microbiano) a decaer significativamente a mayor contenido de humedad a medida que transcurre la incubación.

Esta menor disponibilidad de P-resina y P-NaHCO₃ puede obedecer a mecanismos de adsorción, a mayor contenido de humedad se establece un contacto más íntimo entre el P disuelto de la RF y las superficies adsorbentes incrementando la adsorción (López, 2016); sin embargo la disminución en los valores de P-microbianos a mayor contenido de humedad requiere de explicación ya que la mayor humedad favorece la inmovilización biológica; sin embargo, en condiciones de campo, que no es el caso actual, López et al. (2004) han encontrado mayor actividad microbiana durante la estación seca lo que apoya la idea de que en los ecosistemas estacionales los microorganismos del suelo son más activos en el periodo seco, precisamente cuando sus depredadores y las raíces de las plantas tienen menor actividad.

La fracción Pi-NaOH no fue afectada por el contenido de humedad, lo cual no es sorprendente ya que esta fracción está involucrada en menor forma en la reorganización del P por actividades ligadas a la mineralización (Kellogg et al., 2006; López et al., 2007), al contrario, la fracción Po-NaOH, susceptible a cambios por procesos de mineralización-desorción (Kellogg et al., 2006) si fue afectada por los cambios de humedad con fluctuaciones entre los 3 y 15 días. El contenido de humedad también afectó a la fracción P-HCl (Figura 2b) y el P-residual con fluctuaciones a lo

largo del periodo de incubación que obedecen a la transformación de una fracción mayor (P-residual) en otra (P-HCl).

Como resultado de la redistribución de las fracciones mayores (P-HCl y P-residual) ocurre un incremento significativo a lo largo de la incubación para las fracciones resina y microbiana en el suelo Iguana, y en las fracciones resina, microbiana, Pi y Po para el suelo Bramón, en el caso de este último, muy posiblemente asociado con los mayores niveles de materia orgánica y mayor actividad biológica de ese suelo (Ravindran y Yang, 2015).

CONCLUSIONES

La distribución de las fracciones de P en el suelo arenoso Iguana sin fertilizar reflejó una escasa presencia de P en formas solubles extraíbles con resina y con bicarbonato, igual situación se presentó en el caso del P combinado con calcio (P-HCl) y el extraíble con NaOH, por lo que la mayor parte del fósforo se encontró asociada a la fracción residual y de ahí la escasa disponibilidad de P de este suelo. Al contrario, el suelo Bramón a pesar de su fuerte acidez presentó altos niveles P extraíble con bicarbonato, la mayor proporción de P en este suelo igualmente se alojó en la fracción residual; sin embargo debido a las cantidades significativas de Ca intercambiable en el suelo Bramón se encontraron niveles moderados de fósforo de P-Ca asociados al apatito y extraíbles con HCl.

La aplicación de la RF a ambos suelos modificó todas las fracciones de P, estos aumentos fueron sustanciales en el caso del P-HCl, resina y residual, lo que indicó claramente un proceso de disolución de la RF el cual fue más acentuado en el caso del suelo Iguana. Como resultado de la redistribución de las fracciones mayores (P-HCl y P-residual) ocurre un incremento significativo a lo largo de la incubación para las fracciones resina y microbiana en el suelo Iguana, y en las fracciones resina, microbiana, Pi y Po para el suelo Bramón.

Resalta el efecto del alto contenido de humedad en disminuir los valores de las fracciones más lábiles (resina y NaHCO₃), lo que implica, una mayor adsorción del P en esta condición hídrica al establecerse un mayor contacto entre las superficies adsorbentes y el fósforo que recién es liberado de la roca fosfórica.

LITERATURA CITADA

1. Brossard, M., Balbino, E. Hien, N. Ndour, J. Leprun y D. López-Hernández. 2015. Usos de suelos en sabanas. Esbozo transatlántico: Sur América y África Centro Occidental. In: R. Falcón et al. (eds.). Tierras Llaneras de Venezuela. Universidad de Las Andes, Mérida, Venezuela. pp. 529-554.
2. Casanova E. y G. Elizalde. 1988. Caracterización mineralógica de algunas rocas fosfóricas venezolanas *Agronomía Tropical* 38: 97-107.
3. Casanova, E. 2007. Efecto de rocas fosfóricas naturales y modificadas sobre la cantidad y calidad de pastos introducidos en Venezuela *Agronomía Tropical* 57: 271-280.
4. Fayiga, A. y G. Obigbesan. 2018. Effect of two moisture regimes on P-release from P treated soils. *Archives of Agronomy and Soil Science* 64: 419-429.
5. Gilabert de B., J., I. López de R. y R. Pérez de R. 1990. Manual de métodos y procedimientos de referencia. Análisis de suelos para diagnóstico de fertilidad. FONAIAP-CENIAP. Maracay. Serie D. N° 26. 164 p.
6. He, Z., H. Yao, D. Calvert, P. Stoffella, X. Yang, G. Chen y G. Lloyd. 2005. Dissolution characteristics of central Florida phosphate rock in an acidic sandy soil. *Plant and Soil*. 273: 157-166.
7. Hedley, M., W. Stewart y B. Chauhan. 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Soc. Am. J.* 46: 970-976.
8. 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: 69-78.
9. Kanabo, I. y R. Gilkes. 1988. The effects of moisture regime and incubation period on the dissolution of North Caroline phosphate rock in soil. *Aust. J. Soil Res.* 26: 153-163.
10. Kellogg, L., S. Bridgham y D. López-Hernández. 2006. Organic phosphorus mineralization. A comparison of isotopic and non-isotopic methods. *Soil Science American Journal* 70: 1349-1358.
11. López-Contreras, A.Y., I. Hernández-Valencia y D. López-Hernández. 2007. Fractionation of soil phosphorus in organic amended farms located on sandy soils of Venezuelan Amazonian. *Biology & Fertility of Soils* 43: 771-777.
12. López-Gutiérrez, J., M. Toro y D. López-Hernández. 2004. Arbuscular mycorrhiza and enzymatic activities in the rhizosphere of *Trachypogon plumosus* in three acid savanna soils. *Soil, Agriculture & Environment* 103: 405-411.
13. López-Hernández, D. 2016. Soils with hardened laterites are they really high P-sorbing? *Ciencia* 24: 178-186.
14. López-Hernández, D. y C. Burnham. 1974. The covariance of phosphate sorption with other soil properties in some British and Tropical soils. *J. Soil Sci.* 25: 196-206.
15. López-Hernández, D. y M. Niño. 1993. Phosphorus mineralization during laboratory incubation in soils derived from different textured parent materials. *Geoderma* 56: 527-537. 1993.
16. López-Hernández, D. 1977. La Química del Fósforo en Suelos Ácidos. Universidad Central de Venezuela. Caracas. 123 p.
17. Mac Kay, A., J. Syers, R. Tillman y P. Gregg. 1986. A simple model to describe the dissolution of phosphate rock materials in soil. *Soil Sci. Amer. J.* 50: 291-296.
18. Morillo, A., O. Sequera y R. Ramírez. 2007. Roca fosfórica acidulada como fuente de fósforo en un suelo ácido con o sin encalado. *Bioagro* 19: 161-168.
19. Nyambati, R.O. y P.A. Opala. 2014. The effect of Minjingu phosphate rock and triple superphosphate on soil phosphorus fractions and maize yield in Western Kenya. *ISRN Soil Science*. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/920541> (consulta del 29/04/2018)
20. Pinto F.A., E.D. De Souza, H.B. Paulino, N. Curi y C.M. Carbone. 2013. P-sorption and desorption in savanna Brazilian soils as a support for phosphorus fertilizer management. *Ciênc Agrotec Lavras* 37: 521-530.
21. Rangel-Vasconcelos, L., D. Zarin, F. Oliveira, S. Vasconcelos, C. Carvalho y M. Santos. 2015. Effect of water availability on soil

- microbial biomass in secondary forest in eastern Amazonia. R. Bras. Ci. Solo 39: 377-384.
22. Ravindran. A. y S. Yang. 2015. Effects of vegetation type on microbial m biomass carbon and nitrogen in subalpine mountain forest soils. Journal of Microbiology, Immunology and Infection 48: 362-369.
23. Rivaie A., P. Loganathan, J. Graham, R. Tillman y T. 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. Nutrient Cycling in Agroecosystems 82: 75-88.
24. Romero, G. y D. López-Hernández. 2018. Evaluación de métodos para la disolución de la roca fosfórica Monte Fresco. Bioagro 30: 151-156.
25. Sequera, O. y R. Ramírez. 2013. Roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico y tiosulfato de amonio como fuente de fósforo para frijol en dos tipos de suelo. Bioagro 25: 39-46.
26. Zapata, F. y R. Roy. 2007. Utilización de las rocas fosfóricas para una agricultura sostenible. Boletín FAO Fertilizantes y Nutrición Vegetal No 13. Roma. 155 p.