
DISPONIBILIDAD DE FÓSFORO EN UN SUELO DE LAS SABANAS BIEN DRENADAS VENEZOLANAS, BAJO DIFERENTES COBERTURAS Y TIPOS DE FERTILIZACIÓN

ZENAIDA LOZANO P., ROSA MARY HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ, CARLOS BRAVO, CARMEN RIVERO, MARCIA TORO y MAVELYS DELGADO

RESUMEN

Con el objetivo de evaluar el efecto de los cultivos de cobertura (gramínea o leguminosa) y el tipo de fertilización sobre la disponibilidad de fósforo en un sistema maíz en siembra directa - ganado, se realizó un experimento en un suelo Typic Plinthustults en las sabanas bien drenadas de Venezuela. El diseño fue completamente aleatorio con arreglo factorial 2×4 (cobertura × fertilización), con tres repeticiones. Las coberturas fueron *Urochloa dictyoneura* (UD), *Centrosema macrocarpum* (CM) y sabana natural (SN) como testigo. Los tipos de fertilización empleados fueron Control (sin fertilización), BRF + M (dosis baja, 25% de P como roca fosfórica + inoculación micorrízica), ARF (dosis alta, el 100% de P como RF), y ARF + FD (dosis alta, P 50% como roca fosfórica, y 50% de P como fosfato diamónico). Se tomaron muestras de suelo a tres pro-

fundidades (0-5, 5-15 y 15-30cm) y en distintos momentos desde la introducción de los cultivos de cobertura en el año 2002, hasta completar tres ciclos maíz-ganado en el 2008. Se midió fósforo disponible (PD-Olsen) y se realizó un fraccionamiento secuencial de P. Los resultados muestran diferencias estadísticas ($p < 0,05$) atribuibles a la cobertura y al tipo de fertilización, tanto en el PD-Olsen como en las fracciones. En las coberturas el PD-Olsen tuvo la tendencia CM>UD>SN, y con los tipos de fertilización la tendencia varió según la cobertura, en CM: ARF+FD>ARF>Control=BRF+M; mientras que en UD: ARF>ARF+FD>Control=BRF+M. La introducción de los cultivos de cobertura aumentó todas las fracciones con relación a SN, principalmente las fracciones moderadamente lábiles, y el P-orgánico>P-inorgánico.

Las sabanas bien drenadas son ecosistemas tropicales caracterizados por una marcada estacionalidad climática y una vegetación dominada por gramíneas de baja productividad primaria, principalmente del género *Trachypogon* (Hernández-Hernández *et al.*, 2010), que se desarrollan en suelos ácidos con alta saturación con aluminio

intercambiable, escaso contenido de materia orgánica y bajo contenido de nutrientes esenciales, especialmente de fósforo (Hernández-Hernández y López-Hernández, 2002; López-Hernández *et al.*, 2005). En las últimas décadas las sabanas han sufrido el intensivo y acelerado incremento de la frontera agrícola y actualmente en la región se desarrollan una gran variedad de agroecosis-

temas que van desde la agricultura de subsistencia hasta sistemas intensivos de producción agrícola vegetal, pecuario y forestal (Hernández-Valencia, 2008). El manejo agrícola tradicional ha involucrado la quema, el establecimiento de monocultivos, el uso de maquinarias para acondicionar el suelo y la fertilización inorgánica con fuentes solubles, lo que ha producido la degradación de mu-

PALABRAS CLAVE / *Centrosema macrocarpum* / Fósforo Disponible / Fraccionamiento Secuencial de Fósforo / Siembra Directa / *Urochloa dictyoneura* /

Recibido: 09/07/2011. Modificado: 16/11/2012. Aceptado: 26/11/2012.

Zenaida Lozano P. Ingeniera Agrónoma, M.Sc y Doctora en Ciencias, Universidad Central de Venezuela (UCV). Profesora, UCV, Venezuela. Dirección: Instituto de Edafología, Facultad de Agronomía, UCV. Apartado 4579. Maracay, Venezuela. e-mail: lozanoz@agr.ucv.ve.

Rosa Mary Hernández-Hernández. Licenciada en Biología y Doctora en Ecología, UCV, Venezuela. Profesora, Universidad Nacional Experimental Simón Rodríguez (UNESR), Venezuela, y Directora, Centro de Agroecología Tropical (CEDAT), Instituto de Estudios Científicos y Tecnológicos (IDECYT), UNESR, Venezuela.

Carlos Bravo. Ingeniero Agrónomo, Universidad Nacional Experimental Rómulo Gallegos (UNERG), Venezuela. MSc. en Ciencias del Suelo, UCV, Venezuela. Doctor en Agronomía, Universidad de Córdoba, España. Profesor, CEDAT-IDECYT-UNESR, Venezuela.

Carmen Rivero. Ingeniera Agrónoma, M.Sc. y Doctora en Ciencias, UCV, Venezuela. Profesora, UCV, Venezuela.

Marcia Toro. Licenciada en Biología, UCV, Venezuela. M.Sc. en Ecología, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas. Doctora en Ciencias Biológicas, Universidad de Granada, España. Profesora, UCV, Venezuela.

Mavelys Delgado. TSU en Química, Instituto Universitario de Tecnología Isaac Newton, Venezuela. Técnico Químico, UCV, Venezuela.

chas áreas, y ha hecho que los sistemas de producción sean cada vez más dependientes de fertilizantes y en gran medida de los fertilizantes fosforados (López-Gutiérrez *et al.*, 2004; Toro *et al.*, 2008).

El fósforo es el segundo elemento (después del nitrógeno) más importante para el crecimiento de las plantas, la producción de los cultivos y su calidad (Alamgir *et al.*, 2012); además, es uno de los elementos que más limita la producción agrícola en las sabanas. La agricultura moderna depende del P derivado de roca fosfórica, la cual es un recurso no renovable y cuyas reservas mundiales actuales podrían agotarse en 50-100 años (Cordel *et al.*, 2009; Dawson y Hilton, 2011), por lo que aumentar aún más el uso de fertilizantes fosforados, en el contexto de una creciente demanda mundial de productos agrícolas, no parece una opción viable (Khan y Hanjra, 2009; Hinsinger *et al.*, 2011). Un manejo agrícola sostenible debe ir encaminado a utilizar mejor las fuentes de P del suelo, ya sea a través de la selección de cultivares más eficientes o de la utilización de estrategias de manejo para optimizar su biodisponibilidad (Vance, 2001; Lambers *et al.*, 2006).

En el suelo existen varias formas químicas de fósforo, incluyendo el inorgánico (Pi) y el orgánico (Po). Estos componentes tienen múltiples fuentes de origen natural y antropogénico, los cuales difieren ampliamente en su comportamiento y destino tanto en suelos naturales como cultivados. Se estima que del P aplicado como fertilizante para los cultivos sólo el 10-20% es aprovechado durante el primer año, debido a que la mayor parte es rápidamente fijado o precipitado a formas de baja solubilidad (Vance, 2001; Vu *et al.*, 2008). En suelos ácidos, la baja disponibilidad de P se genera por la alta reactividad de los fosfatos inorgánicos con los oxihidróxidos de Fe, Al y, en menor proporción, Mn. Bajo estas condiciones las fracciones de Po consideradas menos disponibles pueden estar envueltas en el ciclo estacional del elemento y constituir una fuente importante de P disponible para las plantas, el cual usualmente no es considerado en los análisis de rutina con fines de diagnóstico de fertilidad (Tiessen y Moir, 1993; Beck y Sánchez, 1994; López *et al.*, 2006). La cuantificación los diferentes reservorios de P en el suelo proporciona información respecto al destino del elemento después de la adición de fertilizante. Esto puede contribuir a un mejor entendimiento de su dinámica para desarrollar sistemas de manejo más eficientes en el uso de los fertilizantes fosfatados (Boschetti *et al.*, 2004).

Un método que ha demostrado ser apropiado para caracterizar la fertilidad fosfórica en los suelos ácidos de las sabanas (Nwoke *et al.*, 2003; López-

Contreras *et al.*, 2007) es el fraccionamiento secuencial propuesto por Hedley *et al.* (1982) y modificado por Tiessen y Moir (1993). Las fracciones extraídas corresponden a formas químicas que, de acuerdo a su estabilidad y facilidad de extracción, se podrían relacionar con su capacidad de ser transformadas a formas disponibles para las plantas. El uso de este método también permite estimar la cantidad de Po que puede ser mineralizado (Boschetti *et al.*, 2004). El fraccionamiento secuencial proporciona información sobre la disponibilidad a corto, mediano y largo plazo de las formas de Pi y Po en el suelo, pero no de su composición estructural (Turrión *et al.*, 2007). Una de las utilidades de esta técnica es que permite evaluar cómo manejos específicos afectan el ciclaje de P en el suelo, a través de los cambios que se producen en las diferentes fracciones. Serán más sostenibles aquellos manejos en los que se produzca una mejora o conservación de las fracciones disponibles inmediatamente, a corto y mediano plazo, mientras que los menos sostenibles favorecen la reducción de las fracciones de mayor disponibilidad y el incremento de las fracciones recalcitrantes (Hernández-Valencia, 2008).

Entre las opciones para hacer más sostenibles los agroecosistemas en las sabanas se ha propuesto la utilización de sistemas de manejo conservacionistas con el uso de la siembra directa, cultivos asociados (Berroterán, 1995), cultivos de cobertura (Bravo *et al.*, 2004), sustitución parcial de los fertilizantes de alta solubilidad por fuentes de baja solubilidad y biofertilizantes (Hernández-Hernández *et al.*, 2011), la combinación de fertilización química y biológica y una adecuada aplicación de enmiendas (Toro *et al.*, 2008). Por otro lado, numerosos autores han demostrado que la disponibilidad y fracciones de P pueden verse afectadas por estrategias de manejo tales como la labranza, el sistema de cultivo (monocultivo, rotaciones, asociaciones) y los tipos de fertilización (Horst *et al.*, 2001; Hernández-Valencia, 2008; Zhao *et al.*, 2008; Takeda *et al.*, 2009; Alguacil *et al.*, 2010; Betencourt *et al.*, 2012); por lo que se hace necesario identificar cómo afectaría un manejo conservacionista que incluya la utilización de siembra directa, cultivos de cobertura y tipos de fertilización alternativos, el contenido y distribución de P tanto orgánico (Po) como inorgánico (Pi) en suelos de sabana.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la utilización de cultivos de cobertura (gramínea o leguminosa) usados como barbechos mejorados y del tipo de fertilización fosfórica, sobre la disponibilidad de fósforo en un sistema maíz en siembra directa - ganado bovino, en un suelo de las sabanas bien drenadas del estado Guárico, Venezuela.

Materiales y Métodos

Para evaluar el efecto de diferentes coberturas y el tipo de fertilización fosfórica sobre la disponibilidad de fósforo, en el año 2002 se estableció un ensayo de campo a largo plazo en un suelo clasificado como Typic Plinthustults, ubicado en la Estación Experimental La Iguana, de la Universidad Nacional Experimental Simón Rodríguez (UNESR), en las sabanas del suroriente del estado Guárico, Venezuela (8°25'N y 65°25'O, 80-120msnm). En la zona el clima es marcadamente estacional, con una época de sequía y una lluviosa. La precipitación anual promedio es de 1369mm y la temperatura media es de 27,3°C (Bravo *et al.*, 2004). Para la selección de las dimensiones y orientación de las parcelas, número de muestras y profundidades de muestreo, se realizó un estudio previo de variabilidad espacial de suelos (Hernández-Hernández *et al.*, 2011). Los cultivos de cobertura fueron la gramínea *Urochloa dictyoneura* (UD) y la leguminosa *Centrosema macrocarpum* (CM), como barbechos mejorados para la siembra directa de maíz en el periodo húmedo y posterior pastoreo con ganado bovino en el periodo seco. Se utilizaron parcelas de 75×350m en cada cultivo de cobertura. Para el establecimiento de las coberturas se realizó una preparación convencional del terreno (dos pases cruzados de rastra) y se aplicó roca fosfórica a razón de 300kg·ha⁻¹, incorporada con un pase de rastra. Se usó 4kg·ha⁻¹ de semillas de UD y 3kg·ha⁻¹ de semillas de CM.

Luego de establecidos los cultivos de cobertura (2002-2004), a partir del año 2005 se sembró anualmente maíz en siembra directa, usando las coberturas introducidas (UD y CM) como residuos para la siembra directa. Luego de la cosecha se introdujo ganado para el pastoreo de la soca del maíz, hasta completar tres ciclos maíz - ganado. Para el maíz se aplicó una dosis básica de 150kg·ha⁻¹ N, 150kg·ha⁻¹ P₂O₅ y 100kg·ha⁻¹ K₂O. Con la misma dosis de N y K₂O, se varió la dosis de P₂O₅ en los siguientes tipos de fertilización: Control: sin fertilización, BRF+M: dosis baja de P como roca fosfórica (25% P₂O₅ + inoculación con micorriza), ARF: dosis alta de P (100% P₂O₅ como roca fosfórica) y ARF+FD: dosis alta de P (50% P₂O₅ como roca fosfórica + 50% P₂O₅ como fosfato diamónico). El diseño fue completamente aleatorio con arreglo factorial 2×4 (cobertura×fertilización), con tres repeticiones dentro de cada cobertura, en parcelas de 900m² (15×60m) por cada tipo de fertilización. Al término de cada cosecha del maíz el pastoreo fue intensivo, con la introducción en cada parcela de un rebaño de ganado bovino equivalente a 2au·ha⁻¹, consumiendo *ad libitum* la biomasa disponible proveniente de los residuos de cosecha del maíz y el rebrote

TABLA I
DESCRIPCIÓN DE LAS ÉPOCAS DE MUESTREO EN ENSAYO UBICADO
EN LAS SABANAS BIEN DRENADAS DEL ESTADO GUÁRICO

Época de muestreo	Etapas del ensayo	Días después del establecimiento	Periodo climático
T0	Caracterización inicial	0	Prehúmedo
T1	Efecto de las coberturas	671	Prehúmedo
T2	Antes del corte 1 ^{er} ciclo maíz-ganado	1044	Prehúmedo
T3	Floración 1 ^{er} ciclo maíz-ganado	1120	Húmedo
T4	Después del pastoreo 1 ^{er} ciclo maíz-ganado	1303	Seco
T5	Antes del corte 2 ^{do} ciclo maíz-ganado	1408	Prehúmedo
T6	Floración 2 ^{do} ciclo maíz-ganado	1506	Húmedo
T7	Después del pastoreo 2 ^{do} ciclo maíz-ganado	1742	Seco
T8	Antes del corte 3 ^{er} ciclo maíz-ganado	1783	Prehúmedo
T9	Floración 3 ^{er} ciclo maíz-ganado	1884	Húmedo
T10	Después del pastoreo 3 ^{er} ciclo maíz-ganado	2094	Seco

de las coberturas. Para el establecimiento de las profundidades de muestreo se tomó como base el espesor promedio de los dos primeros horizontes (0-15 y 15-30cm). Con la finalidad de evaluar las variaciones en los contenidos de P producto de los residuos en superficie, se tomó como primera profundidad la capa de 0-5cm del primer horizonte, quedando tres profundidades de muestreo: 0-5, 5-15 y 15-30cm. Se realizaron evaluaciones en 11 épocas desde el inicio del ensayo hasta culminar los tres ciclos maíz - ganado. La información sobre las épocas de muestreo se presenta en la Tabla I.

Para evaluar los efectos de los tipos de cobertura y fertilización sobre la disponibilidad de fósforo, en cada repetición se tomaron cuatro muestras compuestas por cada profundidad y época, y se realizaron análisis en cada una de las muestras colectadas. Dichas muestras fueron previamente secadas al aire y tamizadas (2mm). Se analizó fósforo disponible por extracción con la solución de Olsen (PD-Olsen) y determinación por el método colorimétrico del molibdato-ácido ascórbico (Watanabe y Olsen, 1965), y se realizó un fraccionamiento secuencial de P por el método propuesto por Hedley *et al.* (1982), modificado por Tiessen y Moir (1993). Las formas de fósforo cuantificadas por el fraccionamiento fueron: 1) fósforo muy lábil, extraído con una membrana de intercambio aniónico (Pi-MIA) de 2x5cm saturada con bicarbonato, que representa el P inorgánico en la solución del suelo o el adsorbido muy débilmente sobre hidróxidos o carbonatos; 2) fósforo lábil (Po-NaHCO₃ y Pi-NaHCO₃ 0,5M) que involucra el P inorgánico (Pi) adsorbido débilmente y el P orgánico (Po) fácilmente hidrolizable; 3) fósforo moderadamente lábil (Pi-NaOH y Po-NaOH 0,1M) que es el Pi unido a la superficie de las arcillas o de los óxidos e hidróxidos de Fe y Al y el Po asociado a compuestos orgánicos tales como ácidos fúlvicos y húmicos; 4) fósforo moderadamente lábil, orgánico estable (Pi-HCl 1M) e inorgánico ocluido y ligado a minerales primarios (Po-HCl 1M) y

5) fracción recalcitrante (Po-HCl concentrado), asociado a la materia orgánica particulada y/o protegido por la celulosa. La determinación de fracciones de Pi y Po en HCl 1M se basó en los resultados de He *et al.* (2006), quienes consiguieron una apreciable cantidad de Po en la extracción con HCl diluido en algunos suelos. La concentración de P en cada extracto fue determinada por el método de Murphy y Riley (1962). Los datos fueron analizados estadísticamente con los programas Statistix 8.0 y SPSS 11.0, usando la prueba de Tukey para detectar las diferencias entre medias por tipo de cobertura y tipo de fertilización.

Resultados y Discusión

Las características químicas del suelo evaluado antes de la instalación del ensayo son consistentes con las descritas para otros Ultisoles de las sabanas orientales venezolanas. Al comparar los valores obtenidos con los niveles críticos señalados por Gilabert *et al.* (1990), se destaca que la reacción del suelo es fuertemente ácida a todas las profundidades (pH de 4,7-5,0), sin problemas de sales (conductividad eléctrica <1dS·m⁻¹), con baja capacidad de retención de nutrientes evidenciada por una capacidad de intercambio catiónico entre 1,8 y 3,1cmol⁺·kg⁻¹, debido a la textura gruesa de las capas consideradas (>75% arena total), bajos contenidos de materia orgánica (1,0-1,3%) y predominio de arcillas de baja actividad (Matheus, 1986). Los contenidos de N inorgánico (14,3-20,4mg·kg⁻¹), P disponible (8,7-11,3mg·kg⁻¹), K (19,1-42,0mg·kg⁻¹), Ca (29,8-57,7mg·kg⁻¹) y Mg (32,6-39,9mg·kg⁻¹) intercambiable son bajos, especialmente el P y el Ca, y no presentan problemas por Na intercambiable. En los micronutrientes como Cu (0,3-0,5mg·kg⁻¹), Zn (0,7-1,3mg·kg⁻¹) y Mn (1,1-5,0mg·kg⁻¹) también se presentan en valores bajos, no obstante el Fe (25,9-30,5mg·kg⁻¹) presenta valores medios, posiblemente debido al material parental del suelo. Con excepción del Mg y

los microelementos Fe, Cu y Zn, los mayores valores de los elementos se presentan a nivel superficial y disminuyen a medida que se profundiza en el perfil. Los bajos contenidos de nutrientes encontrados en este suelo pueden deberse a las características del material parental y a la textura, donde por ser un suelo arenoso se producen mayores pérdidas por lixiviación. Para el desarrollo de cualquier cultivo en este suelo se hace necesaria la aplicación de fertilizantes y de materia orgánica, que al descomponerse pudiera suplir algunos elementos y además mejorar la capacidad de retención de nutrientes.

Fósforo disponible (PD-Olsen)

Cuando se usan sistemas de manejo conservacionistas que incluyen la disminución de las operaciones de labranza y la aplicación de residuos en superficie, se produce un incremento de elementos como el fósforo, atribuido a la naturaleza poco móvil del elemento, a la aplicación superficial de los fertilizantes fosforados y a la descomposición de los residuos en superficie (Ekebert y Riley, 1997). Otros autores atribuyen este comportamiento a la mayor disponibilidad de Po al aumentar su inmovilización en la biomasa microbiana, el cual luego se libera lentamente (Evangelou y Blevins, 1988), a un aumento de la actividad de fosfatasa ácida (Contreras *et al.*, 1996), o a la disminución de la fijación de fósforo por parte del suelo al disminuir el contacto suelo-fertilizante (Selles *et al.*, 1999).

Durante el periodo de evaluación los contenidos de PD-Olsen presentaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) por efecto del tipo de cobertura, tipo de fertilización, con la profundidad y en la diferentes épocas consideradas. También se presentaron diferencias estadísticas en todas las interacciones para estas fuentes de variación. En general, los valores de PD-Olsen variaron de 0,2 a 26,8mg·kg⁻¹ en las coberturas introducidas (UD y CM) y de 0,3 a 6,2mg·kg⁻¹ en la SN, siendo clasificados como bajos para SN y de bajos a altos en UD y CM (Gilabert *et al.*, 1990). Las diferencias entre SN y las coberturas introducidas se podrían atribuir a la aplicación de fertilizantes tanto para el establecimiento de los cultivos de cobertura, como para el cultivo de maíz en los tres ciclos consecutivos maíz-ganado.

La comparación entre coberturas para los tratamientos Control (sin fertilización fosfórica) se presenta en la Figura 1, donde se aprecia que los valores de PD-Olsen tienen una tendencia similar (CM>UD>SN) en las tres profundidades consideradas, con diferencias estadísticas entre tipo de cobertura en la mayoría de las épocas evaluadas. En SN los valores (3,0-6,0mg·kg⁻¹) son similares a lo largo del

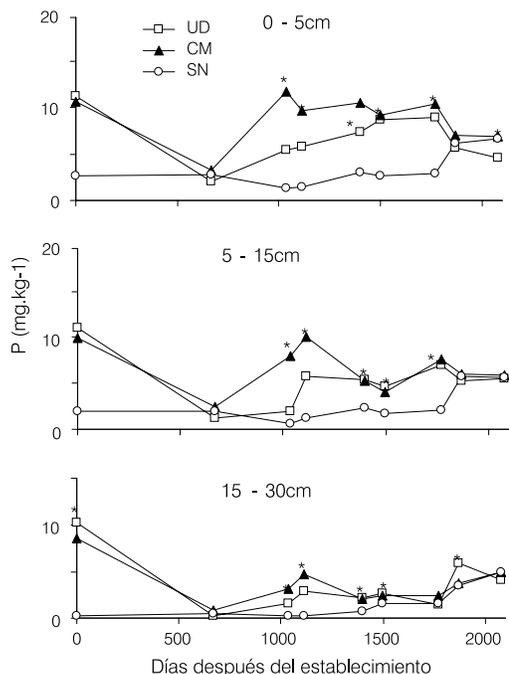


Figura 1. Dinámica del fósforo disponible (P) en los tipos de cobertura *Urochloa dictyoneura* (UD), *Centrosema macrocarpum* (CM) y sabana natural (SN), a las profundidades evaluadas, en el periodo 2002-2008.

* Indica diferencias estadísticas significativas entre tipo de cobertura para una misma profundidad y época (Tukey, $P < 0,05$).

periodo de evaluación; mientras que en las coberturas introducidas, los valores iniciales eran $\sim 10,0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, superiores a los de SN, posiblemente debido a la mineralización de algunas formas orgánicas producto de las operaciones de labranza previas a la siembra de las coberturas introducidas, tal y como sugieren Guiffre *et al.* (1998). A los 667 días después del establecimiento (dde) el contenido de PD-Olsen disminuye en CM y UD a contenidos cercanos a $2,0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ a pesar de la aplicación de roca fosfórica en el establecimiento, posiblemente por efecto de la absorción de P por parte de los cultivos de cobertura, el lavado a capas más profundas o la formación de compuestos secundarios de Fe y Al, como sugiere Hernández-Valencia (2008) para un suelo de características similares. Posteriormente, la tendencia es a aumentar a valores similares a los iniciales en las capas de 0-5 y 5-15cm, más rápidamente en CM y a valores $\sim 5,0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ en la capa más profunda.

Heisinger (2001) señala que las plantas tienen diferentes mecanismos para adquirir P en suelos bajos en este elemento, tales como acidificación de la rizósfera, exudación de carboxilatos y secreción de fosfatasa. No todas las especies muestran las mismas adaptaciones, por lo que difieren en el pool de P al cual tienen acceso. En las coberturas introducidas los contenidos de PD-Olsen se relacionaron con la absorción

de Ca^{+2} y N-NO_3^- por parte de los cultivos de cobertura y tuvieron una tendencia contraria a la del pH del suelo (Hernández-Hernández *et al.*, 2011). En la cobertura UD (gramínea), con mayor absorción de N-NO_3^- y valores de pH del suelo más altos, se presentaron los menores contenidos de PD-Olsen y en CM (leguminosa), con mayor absorción de Ca^{+2} y menor pH, se presentaron los mayores contenidos. Pérez y Smyth (2005), Pérez *et al.* (2007), Lozano *et al.* (2009) y Lozano *et al.* (2010), señalan que la acidificación del suelo en la leguminosa pudiera estar asociada a una mayor absorción de Ca^{+2} y la dependencia de la fijación biológica de N_2 de esta especie, lo cual puede resultar en un exceso de cationes en la planta y un flujo de H^+ a través de las raíces hacia la rizósfera para mantener la electroneutralidad de las células; por el contrario, en la gramínea se produce mayor absorción de aniones como N-NO_3^- , que por reducción en las raíces puede generar gran cantidad de OH^- citoplasmático, el cual pudiera inducir la síntesis de ácidos orgánicos y provocar la extrusión de OH^- hacia la rizósfera.

La disminución del pH del suelo cuando el cultivo de cobertura fue una leguminosa, junto a déficit de P y Ca producto de una mayor absorción (Hernández-Hernández *et al.*, 2011), pudo promover la solubilización de los fosfatos del suelo, ya sea del material parental o de la roca fosfórica aplicada, en este caso la aplicada para el establecimiento de las coberturas. Por otro lado, cuando el cultivo fue una gramínea, los mayores contenidos de Ca^{+2} en solución y alto pH del suelo pudieron limitar la disolución de las rocas fosfóricas. Estos resultados parecen contradictorios, ya que se sabe que a pH ácido se solubilizan el Al y el Fe, y la disponibilidad del P merma por la formación de compuestos de Al-P y Fe-P, por lo que se requiere de otros estudios para determinar si las mejoras en la disponibilidad de P, debido a la acidificación de la rizósfera por las leguminosas, tal como se observó en este ensayo, son también aplicables en suelos con alta capacidad de retención de P.

La dinámica del contenido de PD-Olsen para los diferentes tipos de fertilización en la cobertura UD se presenta en la Figura 2. Se aprecian a partir de los 1044 dde diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre tipo de fertilización en las tres profundidades consideradas, con los mayores valores de PD-Olsen ($3,7-21,5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) en los tratamientos ARF y ARF+FD y

los menores ($1,6-10,1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) en Control y BRF+M, lo que era de esperarse por la mayor dosis de P aplicada en los primeros. Los mayores contenidos de PD-Olsen se presentaron en las capas superficiales (0-15cm), principalmente en los tratamientos ARF+FD y ARF, y ello se puede asociar a la naturaleza poco móvil del elemento y a la profundidad de incorporación del fertilizante fosforado. Estos resultados son similares a los de Singh y Lal (2005), quienes señalan que la adopción de la práctica de labranza reducida y la aplicación poco profunda de fertilizante en el momento de la siembra resultó en un incremento de la estratificación de nutrientes en la superficie del suelo en la capa de 0-10cm.

Las menores diferencias absolutas entre tratamientos de fertilización se presentaron en las épocas de floración (periodo húmedo) de los tres ciclos evaluados (1120, 1506 y 1884 dde), posiblemente debido a la absorción por parte del cultivo maíz. Los contenidos de PD-Olsen al final del experimento, similares o inferiores a los iniciales en todos los tipos de fertilización, pudieran indicar una estabilización del P en sus formas menos disponibles, tales como ocluido, aso-

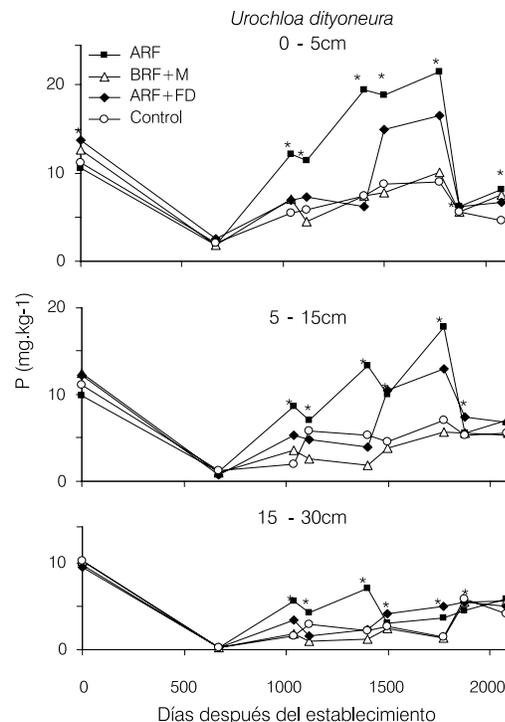


Figura 2. Dinámica del fósforo disponible (P) en los cuatro tipos de fertilización con la cobertura *Urochloa dictyoneura*, a las profundidades evaluadas durante el periodo 2002-2008. Control: testigo sin fertilización; ARF: dosis alta de P (100% P_2O_5 como roca fosfórica); ARF+FD: dosis alta de P (50% del P_2O_5 como roca fosfórica + 50% como fosfato diamónico); y BRF+M: dosis baja de P (25% del P_2O_5 como roca fosfórica + inoculación con micorrizas). * indica diferencias estadísticas significativas entre tipo de fertilización para una misma profundidad y época (Tukey, $P < 0,05$).

ciado a óxidos de Fe y Al o asociado al Ca, como sugiere su correlación negativa y significativa con Fe (Pearson, $r = -0,286$), Al ($r = -0,238$) y Ca ($r = -0,326$), y como lo señalan Hernández-Hernández *et al.* (2011). En general, para la cobertura UD (gramínea) la tendencia de PD-Olsen con el tipo de fertilización fue $ARF > ARF+FD > Control = BRF+M$.

En la cobertura CM, al igual que en UD, las diferencias entre tratamientos de fertilización sólo fueron significativas ($p < 0,05$) a partir de los 1044 dde (Figura 3). Para esta cobertura los contenidos de PD-Olsen variaron de 0,7 a 21,0 mg·kg⁻¹, calificados de medio a bajo (Gilbert *et al.*, 1990). En la mayoría de la épocas, a las tres profundidades consideradas los mayores contenidos de PD-Olsen se presentaron en los tratamientos ARF+FD y ARF, y los menores en Control y BRF+M, pero a diferencia de UD, en CM la tendencia de PD-Olsen con el tipo de fertilización fue: $ARF+FD > ARF > Control = BRF+M$.

Estas diferencias en el PD-Olsen entre CM y UD con relación a los tratamientos de fertilización se reflejaron en los contenidos de nutrientes en tejido vegetal y en los rendimientos promedio del maíz para los tres ciclos del cultivo considerados (Hernández-Hernández *et al.*, 2011). Cuando el cultivo de cobertura fue UD el mejor rendimiento de maíz se obtuvo cuando se usó una dosis alta de P con una fuente de baja solubilidad (ARF) y cuando el cultivo de cobertura fue CM el mejor rendimiento se obtuvo con una dosis alta de P con la mezcla de fuentes de

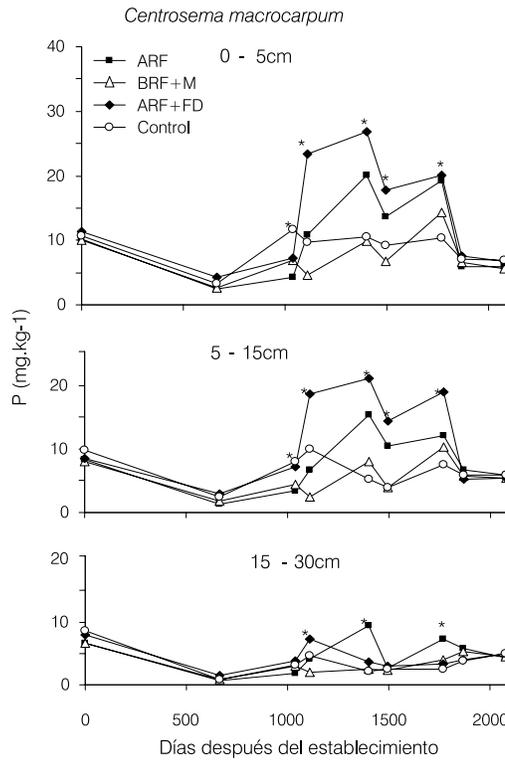


Figura 3. Dinámica del fósforo disponible (P) en los cuatro tipos de fertilización con la cobertura *Centrosema macrocarpum*, a las profundidades evaluadas durante el periodo 2002-2008. Control: testigo sin fertilización; ARF: dosis alta de P (100% P₂O₅ como roca fosfórica); ARF+FD: dosis alta de P (50% del P₂O₅ como roca fosfórica + 50% como fosfato diámonico); y BRF+M: dosis baja de P (25% del P₂O₅ como roca fosfórica + inoculación con micorrizas).

* indica diferencias estadísticas significativas entre tipo de fertilización para una misma profundidad y época (Tukey, $P < 0,05$).

baja y alta solubilidad (ARF+FD). Los rendimientos promedio fueron Control= 0, BRF+M= 3060, ARF= 5576, ARF+FD= 4981 kg·ha⁻¹ en UD; y Control= 316, BRF+M= 5570, ARF= 6442, ARF+FD= 6586 kg·ha⁻¹ en CM.

Fracciones de P en el suelo, bajo diferentes coberturas y fertilización, comparadas a la sabana natural

En la Tabla II se presentan los contenidos promedios de cada fracción de P del suelo bajo estudio, realizada a los 1120 dde (floración del primer ciclo maíz-ganado). Sólo se realizó el fraccionamiento de P para la capa superficial (0-5cm) y no se consideró el P residual, basado en los trabajos de Silva (2006), quien no consideró diferencias por efecto del tipo de cobertura en la fracción residual y en ninguna de las fracciones y por debajo de 5cm, en un suelo de características similares.

Las fracciones determinadas fueron membrana de intercambio (Pi-MIA), bicarbonato de sodio 0,5M (Pi-NaHCO₃), hidróxido de sodio 0,1M (Pi-NaOH, Po-NOH), ácido clorhídrico diluido 1M (Pi-HCl_{dil}, Po-HCl_{dil}) y ácido clorhídrico concentrado (Po-HCl_{con}), las cuales representan compartimientos de P con diferente grado de disponibilidad para las plantas (lábil, moderadamente lábil y recalcitrante). En algunas de las fracciones se consideraron las formas orgánicas (Po) e inorgánicas (Pi) de P. En la mayoría de las fracciones analizadas se presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) por efecto del tipo de cobertura (excepto en Pi-HCl_{dil} y Po-HCl_{dil}), por efecto del tipo de fertilización y

TABLA II
DIFERENTES FRACCIONES DE P (mg·kg⁻¹) EN LA CAPA SUPERFICIAL DEL SUELO BAJO LOS TIPOS DE COBERTURA Y FERTILIZACIÓN, EN LA ÉPOCA DE FLORACIÓN DEL SEGUNDO CICLO MAÍZ-GANADO

Tipo de cobertura	Tipo de fertilización	P- Resina (solución)	P-NaHCO ₃ 0,5M (Adsorbido a los coloides)		P-NaOH (Quimioadsorbido)		P-HCl 0,1M (Estable, ocluido y cristalino)		P-HCl concentrado (Asociado a la MOP)	P-bio/Po
		Pi	Pi	Po	Pi	Po	Pi	Po	Po	
Sabana natural		0,95	0,99	1,72	7,82	5,87	3,12	17,10	0,63	0,4
<i>Urochloa dictyoneura</i>	Control	3,09 c ¹	3,75 a	2,56 a	11,34 a	5,47 bc	2,92	17,23	0,00	0,7
	BRF+M	3,53 bc	2,03 b	1,39 b	5,30 c	9,24 ab	3,32	16,97	1,10	0,4
	ARF	5,58 a	2,32 b	1,22 b	11,93 a	3,08 c	7,65	12,75	0,95	1,1
	ARF+FD	4,14 b	1,96 b	1,34 b	8,40 b	12,68 a	8,94	11,21	0,47	0,6
<i>Centrosema macrocarpum</i>	Control	2,37 b	3,45 a	2,35 ab	10,91 b	3,22	8,70 ab	11,54 bc	2,08	0,9
	BRF+M	0,95 c	1,06 b	1,88 b	2,58 c	2,33	2,33 c	18,11 a	1,42	0,2
	ARF	4,93 a	4,07 a	2,77 ab	11,64 b	3,82	3,97 bc	16,34 ab	1,43	0,8
	ARF+FD	2,44 b	3,16 a	3,41 a	21,39 a	0,93	11,05 a	9,26 c	1,10	1,8
		-----Fracción lábil-----			-----Fracción moderadamente lábil-----			--Fracción-- recalcitrante		

Pi: fósforo inorgánico; Po: fósforo orgánico; MOP: materia orgánica particulada; P-bio: fósforo biodisponible (Pi-resina+Pi-NaHCO₃+Pi-NaOH); Control: sin fertilización; BRF+M: dosis baja de P (25% del P₂O₅ como roca fosfórica + inoculación con micorrizas); ARF: dosis alta de P (100% P₂O₅ como roca fosfórica); y ARF+FD: dosis alta de P (50% del P₂O₅ como roca fosfórica + 50% como fosfato diámonico).

¹ Letras minúsculas diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tipos de fertilización en una misma cobertura (Tukey, $P < 0,05$).

de la interacción cobertura × fertilización (excepto Po-HCl_{con}).

De las fracciones de P evaluadas, la dominante en el suelo estudiado fue la fracción moderadamente lábil, con ~80%. Entre las fracciones de Pi y Po, la predominante fue Po con un 51%. Estos resultados son similares a los de Xavier *et al.* (2009), quienes reportan que el Po representó el 50% del P total de los suelos arenosos estudiados, mostrando un importante papel en el ciclaje de P, considerando que la contribución de esta fracción a la suplencia de P y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas puede ser tan importante como el Pi.

Al comparar la sumatoria del P extraído en todas las fracciones en las coberturas introducidas (UD y CM) con relación a la SN, se produjo un incremento promedio entre 12 y 38%, con excepción del tratamiento BRF+M en CM, donde hubo una reducción del 20%. El mayor incremento en las coberturas introducidas con relación a SN fue en el Pi (76%) y en la fracción lábil (125%), producto de la fertilización fosfórica aplicada. Posiblemente tanto el P incorporado con los fertilizantes como las formas orgánicas moderadamente lábiles fueron utilizadas por el cultivo o mermadas para favorecer las fracciones que mostraron incrementos, tal y como sugiere Hernández-Valencia (2008).

De las fracciones evaluadas, el Pi-MIA representó el 26, 50 y 30% de la fracción lábil para las coberturas SN, UD y CM, respectivamente (Tabla II). Los contenidos de P en esta fracción tuvieron la tendencia UD>CM>SN, por efecto de la fertilización se presentaron diferencias estadísticas dentro de las coberturas introducidas (UD y CM), con los mayores valores de P para ARF y ARF+FD y los menores para BRF+M y Control, lo que era de esperar por la menor o ninguna aplicación de P en los últimos. Los resultados obtenidos difieren de los obtenidos por Silva (2006), quien trabajando con macro y microagregados en un Entisol arenoso ácido de la misma zona, no obtuvo diferencia estadísticamente entre tipo de cobertura para la fracción PI-MIA.

Para la fracción P-NaHCO₃ (Tabla II), que se considera como el P en equilibrio con la solución del suelo por el aporte de los coloides, se presentaron diferencias estadísticas significativas (p<0,05) entre tipos de cobertura y fertilización tanto en Pi como en Po. También se presentaron diferencias con relación al tipo de P predominante en las coberturas introducidas; en la cobertura UD Pi>Po en todos los tratamientos de fertilización, mientras que en la cobertura CM, Pi>Po sólo en los tratamientos Control y ARF. Todos los valores de Pi-NaHCO₃ en las coberturas introducidas fueron superiores a los de SN, los de Po-NaHCO₃ fueron superiores en todos los tipos de fertilización en la

cobertura CM, pero para UD, sólo en el tratamiento Control. Ninguno de las coberturas evaluadas agotaron el Pi-NaHCO₃ del suelo y en promedio el contenido fue mayor en CM, con un incremento del 196% con relación a SN. El nivel de Pi-NaHCO₃ bajo CM posiblemente resulta de la combinación de dos procesos que se contrarrestan: el aumento de P como consecuencia de la acidificación de la rizosfera y disolución de fuentes de P escasamente soluble, y la disminución de P como consecuencia de la captación y agotamiento por parte de las plantas, tal y como señalan Li *et al.* (2008) para cultivos de leguminosas. El Po-NaHCO₃, considerado un pool relativamente disponible para las plantas, aumentó 51% en CM, pero disminuyó 5% en BD. Esta tendencia opuesta entre los cultivos de gramínea y leguminosa ha sido señalada por Li *et al.* (2008)

Los valores de Pi y Po extraídos con NaOH representan los fosfatos químicamente ligados a Fe⁺³ y Al⁺³ (Tabla II). Esta fracción puede ser una fuente importante de P disponible en suelos manejados sin fertilización (Nwoke *et al.*, 2003). Se presentaron diferencias estadísticas (p<0,05) entre tipos de cobertura y fertilización en el Pi-NaOH para ambas coberturas y en el Po-NaOH sólo para UD. Los mayores valores tanto de Pi-NaOH como de Po-NaOH se presentaron en la cobertura UD, con excepción del tratamiento ARF+FD, donde el Pi-NaOH de CM duplica el contenido en UD. Los valores de P-NaOH de este trabajo son superiores a los obtenidos por Siso (2007) al estudiar los suelos Entisol, Vertisol y Ultisol de la misma zona, lo que se puede asociar al aporte por la fertilización con P para el cultivo de maíz. Los resultados contradicen lo señalado por Schmidt *et al.* (1996), quienes consiguieron que el Po-NaOH aumentó en respuesta al suministro de fertilizante, mientras que en este trabajo se encontraron valores más bajos de esta fracción en los tratamientos con la mayor dosis de fertilizante, UD-ARF y CM-ARF+FD.

Las fracciones Pi-MIA, Pi-NaHCO₃ y Pi-NaOH, actuaron como sumidero de los fertilizantes aplicados y del proveniente de la descomposición de residuos de las coberturas y como fuente del P disponible para el maíz (excepto BRF+M), dado su incremento con relación a los contenidos en SN y su correlación significativa con el PD-Olsen (Pearson, r= 0,500). El que en algunas fracciones se presenten los menores valores de P en el tratamiento BRF+M, en ocasiones menores al Control en ambas coberturas, se puede atribuir a que en este tratamiento se aplicó una dosis baja de P y en Control, a pesar de que no se aplicó P, el cultivo de maíz no se desarrolló, por lo que no hubo pérdidas por la absorción del cultivo.

En la Tabla II, se presentan los valores obtenidos de las fracciones Pi

y Po extraído con la solución de HCl_{dit}, fracciones que representan los fosfatos orgánicos estables, los ocluidos y los adsorbidos en la superficie de compuestos cristalinos como sesquioxidos o carbonatos. En esta fracción el Po>Pi (1,3 a 7,8 veces mayor) en la mayoría de los tipos de fertilización, tanto en UD como en CM, con excepción de ARF+FD en la cobertura CM, que presentó valores similares. Para esta fracción sólo se presentaron diferencias estadísticas (p<0,05) para CM, donde se presentó una tendencia contraria entre los tratamientos de fertilización para Pi-HCl_{dit} y Po-HCl_{dit}. Los valores de Pi y de Po en esta fracción están por encima de los valores señalados por Siso (2007) y Silva (2006) en suelos de sabana con características similares.

Por último, la fracción Po-HCl_{con} representa los fosfatos asociados a la materia orgánica (MOP) particulada. En esta fracción (Tabla II) no se apreciaron diferencias estadísticas entre tipo de fertilización para ninguna de las dos coberturas introducidas. Los valores en SN fueron <1mg·kg⁻¹, similares o ligeramente mayores a los de la cobertura UD, mientras que en CM los valores fueron el doble de los observados en SN.

Hernández-Valencia y Bautis (2005) señalan que en suelos de baja disponibilidad de P las plantas y los microorganismos compiten por el P en la solución del suelo, lo que favorece un rápido ciclaje a través de los procesos de mineralización-inmovilización, donde el Po constituye una fuente importante para suplir estas demandas. Neufeld *et al.* (1999), por su parte, señalan que cuando el suelo se fertiliza esta competencia disminuye, produciéndose un aumento proporcional en el contenido de P disponible y una reducción en la tasa de recambio del Po, por lo que proponen un índice que permite comparar las deficiencias de P bajo diferentes manejos y condiciones texturales que denominan P biodisponible = (Pi-resina+Pi-NaHCO₃+Pi-NaOH)/Po total. A medida que este índice es menor indica mayor deficiencia de P y por tanto el ciclaje de Po debe ser más rápido para satisfacer las demandas de plantas y microorganismos. Los valores de este índice obtenidos para los tipos de cobertura y fertilización evaluados (Tabla II), muestran mayor deficiencia de P en SN y BRF+M de ambas coberturas, con los mayores valores (>1) en UD-ARF y CM-ARF+FD. Esto coincide con lo mostrado en las Figuras 2 y 3, donde los mejores tratamientos resultaron ser ARF+FD en CM y ARF en UD.

Los presentes resultados coinciden con los de Oberson *et al.* (1996) y de Li *et al.* (2008), quienes señalan que gramíneas y leguminosas difieren en los mecanismos para la absorción del P del suelo, alterando de diferente manera las fracciones tanto orgánicas como inorgánicas. Una ma-

yor disponibilidad de P en suelos de sabanas con barbecho mejorado se conseguiría usando mezclas de gramíneas y leguminosas, en lugar de usarlas en monocultivo.

Conclusiones

La introducción de los cultivos de cobertura de la leguminosa *Centrosema macrocarpum* (CM) y de la gramínea *Urochloa dictyoneura* (UD) produjeron un incremento en el fósforo disponible a todas las profundidades con relación a la vegetación de sabana, con la tendencia CM>UD>SN a lo largo del período de evaluación.

Los mayores contenidos de P disponible se produjeron en los tratamientos con altas dosis de P, con diferente tendencia dependiendo del tipo de cobertura. En CM el mayor P disponible se produjo en el tratamiento 50% P soluble y 50% P de baja solubilidad, mientras que en UD el mayor contenido de P se produjo en el tratamiento 100% P de baja solubilidad.

De las fracciones de P evaluadas en las diferentes coberturas y tipos de fertilización, la fracción dominante en el suelo estudiado fue la moderadamente lábil, con mayor contenido de P orgánico (Po) que de inorgánico (Pi), lo que indica que el Po podría jugar un papel importante en el ciclo de P en sistemas de manejo conservacionista. En las coberturas introducidas (*Centrosema macrocarpum* y *Urochloa dictyoneura*) se produjo un aumento en la mayoría de las fracciones de P con relación a la sabana natural.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen los apoyos financieros del Fondo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (FONACIT) a través del proyecto G 2002000398 y del Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad Central de Venezuela (CDCH-UCV), a través de los proyectos PG-01-00-6542-2006 y PG-01-33-5067-2006.

REFERENCIAS

- Alguacil MM, Lozano Z, Campoy MJ, Roldán A (2010) Phosphorus fertilisation management modifies the biodiversity of AM fungi in a tropical savanna forage system. *Soil Biol. Biochem.* 42: 1114-1122.
- Beck MA, Sanchez PA (1994) Soil phosphorus fraction dynamic during 18 years of cultivation on a Typic Paleudults. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1424-1431.
- Berroterán JL (1995) Establecimiento y producción de *Andropogon gayanus* Kunth y maíz (*Zea mays* L.) como cultivos asociados en los llanos de Venezuela. *Past. Trop.* 17: 2-8.
- Betencourt E, Duputel M, Coloma B, Desclaux D, Hinsinger P (2012) Intercropping promotes the ability of durum wheat and chickpea to increase rhizosphere phosphorus availability in a low P soil. *Soil Biol. Biochem.* 46: 181-190.
- Boschetti, N, Quintero CE, Befani MR (2004) Dinámica de las fracciones de fósforo en el suelo en una pastura fertilizada. *Rev. Cient. Agropec.* 8: 65-71.
- Bravo C, Lozano Z, Hernández RM, Piñango L, Moreno B (2004) Efecto de diferentes especies de cobertura sobre las propiedades físicas de un suelo de sabana con siembra directa de maíz. *Bioagro* 16: 163-172.
- Contreras F, Rivero C, Paolini J (1996) Efecto de la incorporación de residuos orgánicos y dos tipos de labranza sobre la actividad de la fosfatasa ácida en un alfisol. *Rev. Fac. Agr. (UCV)* 22: 139-149.
- Cordell D, Drangert JO, White S (2009) The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Global Env. Change* 19: 292-305.
- Dawson CJ, Hilton J (2011) Fertiliser availability in a resource-limited world: production and recycling of nitrogen and phosphorus. *Food Policy* 36: 14-22.
- Ekeberg E, Riley H (1997) Tillage intensity effects on soil properties and crop yields in a long-term trial on Morainic loam soil in southeast Norway. *Soil Till. Res.* 42: 277-293.
- Evangelou V, Blevins R (1988) Effects of long-term tillage systems and nitrogen addition on potassium Quantity-Intensity relationships. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 1047-1054.
- Gilbert de BJ, López de RI, Pérez de RR (1990) *Análisis de Suelos para Diagnóstico de Fertilidad. Manual de Métodos y Procedimientos de Referencia.* Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Maracay, Venezuela. 164 pp.
- Giuffrè L, Fernández R, Lupi A, Heredia OS, Pascale C (2002) Efecto de diferentes técnicas de manejo de residuos de la cosecha forestal en algunas propiedades de un suelo Kandiuult en el norte argentino. *Agric. Téc.* 62: 143-149.
- He Z, Fortuna AM, Senwo ZN, Tazisong IA, Honeycutt CW, Griffin TS (2006) Hydrochloric fractions in Hedley fractionation may contain inorganic and organic phosphates. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 893-899.
- Hedley MJ, Stewart JWB, Chauhan BS (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.
- Hernández-Hernández RM, López-Hernández D (2002) El tipo de labranza como agente modificador de la materia orgánica: un modelo para suelos de sabana de los llanos centrales venezolanos. *Interciencia* 27: 529-536.
- Hernández-Hernández RM, Morros ME, Bravo C, Lozano Z, Herrera P, Ojeda A, Morales J, Birbe B (2010) La integración del conocimiento local y científico en el manejo sostenible de suelos en agroecosistemas de sabanas. *Interciencia* 36: 104-109.
- Hernández-Hernández RM, Lozano Z, Rivero C, Toro M, Salazar J, Torres A, Ojeda A, Morales J, Bravo C (2011) *Manejo Agroecológico de Suelos de Sabanas Bien Drenadas con Unidades de Producción Cereal-Ganado.* Informe Final. UNESR/UCV/UBV. Venezuela. 346 pp.
- 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: 57-68.
- Hernández-Valencia I, Bautis M (2005) Cambio en el contenido de fósforo en el suelo superficial por la conversión de sabanas a pinares. *Bioagro* 17: 69-78.
- Hinsinger P (2001) Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant Soil* 237: 173-195.
- Hinsinger P, Betencourt E, Bernard L, Brauman A, Plassard C, Shen J, Tang X, Zhang F (2011) P for two, sharing a scarce resource e soil phosphorus acquisition in the rhizosphere of intercropped species. *Plant Physiol.* 156: 1078-1086.
- Horst WJ, Kamh M, Jibrin JM, Chude VO (2001) Agronomic measures for increasing P availability to crops. *Plant Soil* 237: 211-223.
- Khan S, Hanjra MA (2009) Footprints of water and energy inputs in food production - Global perspectives. *Food Policy* 34: 130-140.
- Lambers H, Shane MW, Cramer MD, Pearse S, Veneklaas E (2006) Root structure and functioning for efficient acquisition of phosphorus: matching morphological and physiological traits. *Ann. Bot.* 98: 693-713.
- Li H, Shen J, Zhang F, Clairotte M, Drevon JJ, Le Cadre E, Hinsinger P (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.
- López M, Alfonso N, Florentino A, Pérez M (2006) Dinámica del fósforo y reducción del aluminio intercambiable en un ultisol sometido a manejo conservacionista. *Interciencia* 31: 293-299.
- López-Contreras AY, Hernández-Valencia I, López-Hernández D (2007) Fractionation of soil phosphorus in organic amended farms located on savanna sandy soils of Venezuelan Amazonian. *Biol. Fertil. Soils* 43: 771-777.
- López-Gutiérrez J, Toro M, López-Hernández D (2004) Seasonality of organic phosphorus mineralization in the rhizosphere of native savanna grass, *Trachypogon plumosus*. *Soil Biol. Biochem.* 36: 1675-1684.
- López-Hernández D, Hernández-Hernández RM, Brossard M (2005) Historia del uso reciente de tierras de las sabanas de América del sur. Estudios de casos en sabanas del Orinoco. *Interciencia* 30: 623-630.
- Lozano Z, Briceño O, Villanueva JG, Bravo C, Hernández RM, Moreno B, Piñango L (2009) Propiedades químicas del suelo bajo cultivos de cobertura en sistemas de labranza conservacionista y su efecto sobre el rendimiento de maíz. *Venezuelos* 17: 24-41.
- Lozano Z, Mogollón A, Hernández RM, Bravo C, Ojeda A, Torres A, Rivero C, Toro M (2010) Cambio en las propiedades químicas de un suelo de sabana por la introducción de pasturas mejoradas. *Bioagro* 22: 135-144.
- Matheus R (1986) *Los suelos de la Estación Experimental La Iguana.* Tesis. Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela. 199 pp.
- Murphy J, Riley J (1962) A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta* 27: 31-36.
- Neufteld H, Dimas VS, Resck VS, Ayarza MA, Zech W (1999) Soil organic matter in oxisol of the brazilian cerrado. En Thomas R, Ayarza MA (Eds.) *Sustainable Land Management of the Oxisol of Latin American Savannas.* CIAT. Cali, Colombia. pp. 89-109.
- Nwoke OC, Vanlauwe B, Diels J, Sanginga N, Osonubi O, Merckx R (2003) Assessment of labile phosphorus fractions and adsorption characteristics in relation to soil properties of West African savanna soils. *Agric. Ecosyst. Env.* 100: 285-294.
- Oberson A, Besson J, Maire N, Sticher H (1996) Microbial processes in soil organic phosphorus in soil. *Extract. Meth. Soil. Sci.* 18: 443-449.

- Pérez, MJ, Smyth TJ (2005) Comparación del efecto de dos especies forrajeras sobre el pH de la rizosfera y la disolución de rocas fosfóricas de diferente reactividad. *Rev. Fac. Agron. (LUZ)* 22: 142-154.
- Pérez MJ, Smyth TJ, Israel DW (2007) Comparative effects of two forage species on rhizosphere acidification and solubilisation of phosphate rocks of different reactivity. *J. Plant Nutr.* 30: 1421-1439.
- Schmidt J, Boul S, Kamprath E (1996) Soil phosphorus dynamic during 17 years of continuous cultivation: fractionation analyse. *Soil. Sci. Soc. Am J.* 61: 1168-1172.
- Selles F, McConkey BG, Cambell CA (1999) Distribution and form 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.
- Silva M (2006) *Efecto del Uso de Coberturas sobre las Fracciones del Fósforo Asociadas a la Materia Orgánica de Distintos Agregados de un Suelo del Estado Guárico*. Tesis. Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela. 55 pp.
- Singh BR, Lal R (2005) Phosphorus management in low-input systems. En Daniels TC, Sims JT, Sharpley AN (Eds.) *Phosphorus, Agriculture and the Environment*. ASA Special Publication. Madison, WI, EEUU. pp. 729-759.
- Siso W (2007) *Estudio del Fósforo en Algunos Suelos Venezolanos*. Tesis. Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela. 55 pp.
- Takeda M, Nakamoto T, Miyazawa K, Murayama T, Okada H (2009) Phosphorus availability and soil biological activity in an Andosol under compost application and winter cover cropping. *Appl. Soil Ecol.* 42: 86-95.
- Tiessen H, Moir JO (1993) Characterization of available P by sequential extraction. En Carter MR (Ed.) *Soil Sampling and Methods of Analysis*. 3^a ed. Canadian Society of Soil Science. Lewis. Boca Raton, FL, EEUU. pp. 75-86.
- Toro M, Bazo I, López M (2008) Micorrizas arbusculares y bacterias promotoras de crecimiento vegetal, biofertilizantes nativos de sistemas agrícolas bajo manejo conservacionista. *Agron. Trop. (Ven)* 58: 215-221.
- Turrion MB, López O, Lafuente F, Mulas R, Ruizpérez C, Puyo A (2007) Soil phosphorus forms as quality indicators of soil under different vegetation covers. *Sci. Total Env.* 378: 195-198.
- Vance CP (2001) Symbiotic nitrogen fixation and phosphorus acquisition. Plant nutrition in a world of declining renewable resources. *Plant Physiol.* 127: 390-397.
- Vu DT, Tang C, Armstrong RD (2008) Changes and availability of P fractions following 65 years of P application to a calcareous soil in a Mediterranean climate. *Plant Soil* 304: 21-33.
- Watanabe F, Olsen S (1965) Test of acid ascorbic method for determining phosphorus in water and NaHCO₃ extracts from soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 29: 677-678.
- Xavier FAS, Senna de Olivera T, Andrade FV, Mendonça ES (2009) Phosphorus fractionation in a sandy soil under organic agriculture in Northeastern Brazil. *Geoderma* 151: 417-423.
- Zhao Q, Zeng DH, Fan ZP, Lee DK (2008) Effect of land cover change on soil phosphorus fractions in Southeastern Horqin Sandy Land, Northern China. *Pedosphere* 18: 741-748.

PHOSPHORUS AVAILABILITY IN A SOIL OF VENEZUELAN WELL-DRAINED SAVANNAHS, UNDER DIFFERENT COVER CROPS AND FERTILIZATION TYPES

Zenaida Lozano P., Rosa Mary Hernández-Hernández, Carlos Bravo, Carmen Rivero, Marcia Toro and Mavelys Delgado

SUMMARY

In order to evaluate the effect of cover crops (grass or legume) and the fertilization type on phosphorus availability in a system no-tillage corn - cattle, a field experiment was conducted on a Typic Plinthustults soil in well drained savannas of Venezuela. The design was a completely random factorial arrangement 2x4 (cover crop x fertilization), with three replicates. The cover crops were *Urochloa dictyoneura* (UD), *Centrosema macrocarpum* (CM), and the natural savannah (SN) as control. The P fertilization types were Control (no fertilizer), BRF + M (low dose, 25% P as rock phosphate + mycorrhizal inoculation), ARF (high dose, 100% P as rock phosphate), and ARF + FD (high dose, 50% P as rock phosphate, and 50% P as diammonium phosphate). Soil samples were taken at three depths (0-5, 5-15 and 15-30cm),

and at various times since the introduced cover crops establishment in 2002, till completion of three cycles of no-tillage corn-cattle (2008). Available phosphorus (PD-Olsen) and sequential phosphorus fractionation were evaluated. Results indicate statistical differences ($p < 0.05$) in both PD-Olsen and fractions, attributable to cover crops and to fertilization type. In the cover crops, PD-Olsen had the trend CM>UD>SN, while the trend of fertilizer sources varied according to type of cover crops, being in CM: ARF+FD>ARF>Control=BRF+M, while in UD it was ARF>ARF+FD>Control=BRF+M. The introduction of cover crops increased all P fractions with respect to SN, mainly the moderately labile fractions, and the P-organic>P-inorganic.

DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM UM SOLO DAS PLANÍCIES BEM DRENADAS VENEZUELANAS, SOB DIFERENTES COBERTURAS E TIPOS DE FERTILIZAÇÃO.

Zenaida Lozano P., Rosa Mary Hernández-Hernández, Carlos Bravo, Carmen Rivero, Marcia Toro e Mavelys Delgado

RESUMO

Com o objetivo de avaliar o efeito dos cultivos de cobertura (gramínea ou leguminosa) e o tipo de fertilização sobre a disponibilidade de fósforo em um sistema de plantio direto de milho-gado, se realizou um experimento em um solo Typic Plinthustults nas planícies bem drenadas da Venezuela. O desenho foi completamente aleatório com arranjo fatorial 2x4 (cobertura x fertilização), com três repetições. As coberturas foram *Urochloa dictyoneura* (UD), *Centrosema macrocarpum* (CM) e planície natural (SN) como testemunho. Os tipos de fertilização empregados foram Controle (sem fertilização), BRF + M (dose baixa, 25% de P como rocha fosfórica + inoculação micorrízica), ARF (dose alta, 100% de P como RF), e ARF + FD (dose alta, P 50% como rocha fosfórica, e 50% de P como fosfato diamônico). Tomaram-se amostras de solo

em três profundidades (0-5, 5-15 e 15-30cm) e em distintos momentos desde a introdução dos cultivos de cobertura no ano 2002, até completar três ciclos milho-gado em 2008. Mediuse fósforo disponível (PD-Olsen) e se realizou um fracionamento sequencial de P. Os resultados mostram diferenças estatísticas ($p < 0,05$) atribuíveis à cobertura e ao tipo de fertilização, tanto no PD-Olsen como nas frações. Nas coberturas o PD-Olsen houve a tendência CM>UD>SN, e com os tipos de fertilização a tendência variou segundo a cobertura, em CM: ARF+FD>ARF>Control=BRF+M; enquanto que em UD: ARF>ARF+FD>Control=BRF+M. A introdução dos cultivos de cobertura aumentou todas as frações com relação a SN, principalmente as frações moderadamente lábeis, e o P-orgânico>P-inorgânico.