

EVALUACIÓN DE INDICADORES DE RETENCIÓN DE FÓSFORO EN SISTEMAS AGRÍCOLAS, GANADEROS Y FORESTALES

EVALUATION OF PHOSPHORUS RETENTION INDICATORS IN AGRICULTURAL, LIVESTOCK AND FORESTRY SYSTEMS

Nélida Nancy Pose^{1*}, Ester Cristina Zamuner¹, Liliana Inés Picone¹, Cecilia del Carmen Videla¹,
Silvia Rodríguez¹, Nestor Maceira²

¹ Facultad de Ciencias Agrarias, UNMdP. CC 276, (7620), Balcarce, Argentina.

² INTA-Balcarce, Ruta 226 km 73,5. CC 276, (7620), Balcarce, Argentina.

* Autor para correspondencia E-mail: nelidapose@gmail.com

RESUMEN

El escurrimiento, erosión o lavado del fósforo (P) del suelo aumentan con altas concentraciones de P extractable y condiciones que favorezcan su transporte. Los objetivos del presente estudio fueron evaluar la relación entre índices de sorción de P (ISP, P_{75} sorbido) y grados de saturación de P (GSP_{ISP} y $GSP_{P_{75}}$) y la asociación con el contenido de carbono orgánico total (COT) y pH del suelo. Se utilizaron muestras de suelo (0-5 cm) con diferentes secuencias de cultivos, pasturas implantadas, plantaciones de acacia (*Acacia melanoxylon*) y eucaliptos (*Eucalyptus globulus*) y campo natural. El análisis estadístico evidenció diferencias entre ISP y P_{75} y el manejo los afectó significativamente. Los mayores valores de ISP y P_{75} , 322 y 506,1 mg P kg⁻¹, respectivamente, se registraron en el monte de acacia. Los menores valores de P_{75} también se registraron en el monte de acacia, con un promedio de 301,5 mg P kg⁻¹ en la rotación cebada-soja y campo natural. ISP alcanzó un promedio de 186,4 mg kg⁻¹ en lotes con rotación, varios años de pastura y campo natural. Los GSP presentaron diferencias entre manejos productivos con mayores valores en campo natural y menores en montes de acacia y eucalipto, $GSP_{P_{75}}$ entre 2,8 y 15,5% y GSP_{ISP} entre 4,6 y 24,3%. En ningún caso se alcanzó el 20% para $GSP_{P_{75}}$, indicado en bibliografía como riesgo de pérdidas de P del suelo. Los parámetros de sorción de P no fueron influenciados por el pH. Los ISP y P_{75} se relacionaron positivamente con el contenido de COT.

Palabras clave: grado de saturación de fósforo, capacidad de sorción, isoterma de punto simple.

ABSTRACT

High concentrations of extractable P and favorable conditions for transport increase runoff, erosion or leaching of phosphorus (P) in the soil. The objectives of this study were to evaluate the relationship between P sorption indices (ISP, P_{75} absorbed) and degrees of P saturation ($GSP_{P_{75}}$ and GSP_{ISP}), and to determine how these are related to the content of total organic carbon (TOC) and pH in the soil. Samples were taken at 0-5 cm depth from soils under different production systems: crop rotations, pastures, acacia (*Acacia melanoxylon*) and eucalyptus (*Eucalyptus globulus*) plantations, and natural grasslands. The statistical analysis showed differences between ISP and P_{75} , and both indices were significantly affected by the production system. The highest values of ISP and P_{75} reached 322 y 506.1 mg P kg⁻¹, respectively, in the acacia forest. The lowest value of P_{75} was also recorded in the acacia plantation, and averaged 301.5 mg P kg⁻¹ in barley in the soil with crop rotation with soybean and natural grassland. ISP averaged 186.4 mg kg⁻¹ in plots with crop rotation, pastures several years, and natural grassland. The GSPs differed between production systems, presenting the

highest values in the natural grasslands, and the lowest values in the acacia and eucalyptus plantations. $GSP_{P_{75}}$ recorded values that ranged between 2.8 and 15.5%, while GSP_{ISP} ranged between 4.6 and 24.3%. $GSP_{P_{75}}$ never reach the value of 20% indicated in the literature as the risk of soil P loss. No effect of pH was observed on P sorption parameters. ISP and P_{75} were positively correlated with TOC content.

Key words: degree of phosphorus saturation, sorption capacity, single-point isotherm

INTRODUCCIÓN

El fósforo (P) es un elemento poco móvil en el suelo y la mayor proporción se encuentra adsorbido a los coloides; sin embargo, a través del escurrimiento de formas disueltas y unidas a las partículas, el P puede alcanzar los cuerpos de agua y estimular el crecimiento de algas y la eutrofización con el riesgo de deteriorar la calidad de la misma (Sharpley et al., 2003). Estas pérdidas de P por escurrimiento superficial o flujo lateral subsuperficial se incrementan cuando las concentraciones de P extractable en el suelo están por encima del rango óptimo agronómico (Beauchemin et al., 1998; Sims et al., 1998). El rango óptimo depende de las características climáticas, fisicoquímicas del suelo, del tipo e intensidad de actividad agrícola, ganadera o forestal que se desarrolle, y del método empleado para determinar la concentración de P. Ante este riesgo de pérdidas de P desde suelos agrícolas hacia aguas superficiales se han desarrollado modelos e índices (Karpinets et al., 2004; Vadas y Sims, 2002) con el fin de ser utilizados para identificar zonas vulnerables a pérdida de P, y así poder lograr una producción agrícola sustentable (Pierzinski, 2005).

La capacidad de sorción de P es un factor importante que controla la liberación del P sorbido al suelo o al agua. Cuando mayor es la capacidad de sorción, mayor es la cantidad de P que puede almacenar el suelo; sin embargo, cuando la cantidad de P sorbido incrementa, la desorción o liberación de P tiende a incrementar, y por ende conduce a posibles riegos de pérdida de P por lavado o escurrimiento.

La capacidad de sorción se determina equilibrando el suelo con un rango de concentraciones de P y calculando la cantidad de P sorbido, bajo condiciones controladas de temperatura. Los datos obtenidos se ajustan con diferentes modelos obteniéndose diversos índices de capacidad de sorción de P (Silva Rossi, 2011). La realización de estas isothermas de sorción consume tiempo, dificultando su uso como análisis de rutina. Bache y Williams (1971) propusieron como metodología la realización de la isoterma de un punto y, a partir de ella, el cálculo del índice de sorción de P. Este índice se calcula como el P sorbido (P_{75}), al agregar 1500 mg P kg⁻¹ de suelo (Pautler y Sims,

2000; Casson 2006) o como el cociente entre el P sorbido (P_{75}) y el logaritmo de la concentración de P en la solución de equilibrio (ISP) (Allen y Mallarino, 2006; Gutierrez Boem et al., 2008).

Independientemente del modo de cálculo del índice de sorción de P, se ha demostrado una buena correlación entre el mismo y la capacidad máxima de sorción de P determinada a partir de isothermas de sorción completas, para suelos con una amplia variedad de propiedades físicas y química (Mozzafari y Sims, 1994; Zhou y Li, 2001). Por lo tanto, el índice de sorción de P puede ser usado para diferenciar suelos con respecto a su capacidad de sorción de este elemento. Sin embargo, últimamente se ha introducido el concepto de grado de saturación de P (GSP), el cual indica el P del suelo que estaría disponible para ser liberado a través de escurrimiento o lavado. Este índice se utiliza para cuantificar el riesgo de eutrofización de cuerpos de agua (Breeuwsmas et al., 1995), y se define como la relación entre el P extractable y la máxima capacidad de sorción de P.

Hasta el momento existe escasa información sobre la caracterización del GSP y su relación con valores de P extractable Bray 1 en suelos del sudeste bonaerense, bajos diferentes sistemas de manejo de suelo y cultivos. Como ejemplo podemos citar la expansión de los cultivos anuales (desde un 4 a un 14,3 %, entre 1988 y 2002) particularmente la soja y las plantaciones forestales, que son dos de las transformaciones más importantes que han ocurrido en los pastizales del Río de la Plata en las últimas décadas (Paruelo et al., 2006). Si los valores de GSP pueden relacionarse con la pérdida potencial de P hacia aguas superficiales, se mejoraría la planificación de los manejos productivos, logrando al mismo tiempo rentabilidad y sustentabilidad ecológica.

Los objetivos de este trabajo fueron a) evaluar la relación entre los índices de sorción de P (ISP y P_{75}), y grados de saturación de P (GSP_{ISP} y $GSP_{P_{75}}$) y, b) relacionar estos parámetros de sorción de P con el contenido de carbono orgánico total y pH en un suelo sometido a manejos contrastantes con condiciones de producción agrícola-ganadero, que contemple rotaciones de cultivos y alternancia con pastura, en sistemas de manejo conservacionista, y la presencia de plantaciones de leñosas

que eventualmente pueden ser pastoreadas por el ganado vacuno.

MATERIALES Y MÉTODOS

La experiencia se llevó a cabo con muestras de suelo provenientes de 8 lotes (potreros) con una superficie promedio de 60 ha, con diferentes sistemas de manejos, incluyendo distintas secuencia de cultivos, pastura, monte de eucaliptos o acacias y campo natural (Tabla 1). Los mismos están situados en el Establecimiento "Cinco Cerros" ubicado en el partido de Balcarce, provincia Buenos Aires (37° S, 58° O), teniendo un suelo complejo de Argiudol típico y Paleudol petrocálcico (USDA Soil Classification, 2006). El área de estudio presenta una topografía que incluye sierras, con zonas de pendiente más pronunciada destinadas a la implantación de pastura y/o pastizal natural. En las áreas con menores pendientes, el uso principal es la agricultura y forestales.

El clima de la región es mesotermal-húmedo-subhúmedo (Burgos y Vidal, 1951) con una temperatura media mensual de 17,2°C y precipitación media mensual de 95 mm (período 1995-2006).

Se denominan "pasturas" a aquellas pasturas implantadas de Agropiro alargado (*Thinopyrum ponticum*), avena (*Avena sativa*) o raigrás anual (*Lolium multiflorum*) que se utilizan para pastoreo vacuno extensivo. Los cultivos agrícolas se realizaron empleando manejo conservacionista, laboreando el suelo únicamente para los cultivos de papa o cuando se rotura una pastura. Los "cultivos de segunda" se refieren a la siembra tardía de un cultivo de verano luego de cosechar un cultivo de siembra invernal.

El campo natural se encuentra en la ladera de las sierras, delimitado por alambrados y con pre-

sencia de afloramientos rocosos. Se ha mantenido casi sin intervención antrópica. Se caracteriza por la presencia de sectores de pajonal de paja colorada (*Paspalum quadrifarium*) dispersos en una matriz de pastos cortos representada por la comunidad del flechillar compuesto por una mezcla de especies de pastos del género *Stipa*, *Piptochaetium*, *Aristida*, *Melica*, *Briza*, *Bromus*, *Eragrostis* y *Poa*, entre otros., combinados con elementos arbustivos como los matorrales de curro (*Colletia paradoxa*) y otros arbustos como *Baccharis tandilensis* (chilca) y *Baccharis articulata* (carquejilla). Entre los pastos predominan *Stipa caudata*, *Poa bonaerenses*, *Bromus unioides* y *Stipa nessiana* (Frangi 1975, Herrera y Laterra 2011).

El monte de eucalipto es una plantación de la especie perenne *Eucalyptus globulus*, implantada en el año 2000, mientras que el monte de acacia es una masa mixta que incluye principalmente *Acacia melanoxylon* (especie perenne) y especies deciduas (Géneros *Populus*, *Quercus*, *Fraxinus*) y perennes (*Pinus*). Estas especies están entremezcladas y presentan pies de diferentes edades. El origen de esta masa se desconoce, pero se la observa desde los años 40 (Igartúa, 2013).

En octubre del 2010 se tomaron 3 muestras compuestas de suelo (repeticiones) constituidas cada una por 20 submuestras de los 5 cm superficiales en cada uno de los lotes. Las muestras se secaron al aire y, luego se tamizaron por 2 mm. Se determinó P extractable Bray 1 (Bray y Kurtz, 1945), carbono orgánico total (COT) por Walkley y Black (1934) y pH en una relación suelo: agua de 1: 2,5 (Dewis y Freitas, 1970).

Se empleó la isoterma de sorción de P de un punto para determinar el P_{75} sorbido (Bache y Williams, 1971), y luego en una segunda etapa estimar el ISP y GSP. Para ello, se agitó 1 g de suelo con 20 mL de una solución de 75 mg P L⁻¹

Tabla 1. Sistemas de cultivo de cada lote correspondiente a 12 años de manejo, en Balcarce, provincia de Buenos Aires.

Table 1. Agricultural systems corresponding to 12 years of crop rotations at Balcarce, Buenos Aires province.

Lote	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
L ₁	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	S1°	Ce/S
L ₂	Ma	T	S1°	s/d	Ma	Gi	Pa	Pa	Pa	Pa	S1°	S	Pa
L ₃	T	S1°	T	Gi	T	S1°	T/S2°	Gi	S1°	Gi	Pa	Pa	Pa
L ₄	s/d	s/d	s/d	s/d	s/d	Ma	Papa	S2°	T/S1°/2°	Gi	Co/S2°	Av	Av/S
L ₅	s/d	T	s/d	T	S1°	T/S2°	Ma	Papa	T/S2°	Ma	T	Ma	T/S
L ₆	Ac	Ac	Ac	Ac	Ac	Ac	Ac	Ac	Ac	Ac	Ac	Ac	Ac
L ₇	Euc	Euc	Euc	Euc	Euc	Euc	Euc	Euc	Euc	Euc	Euc	Euc	Euc
L ₈	CN	CN	CN	CN	CN	CN	CN	CN	CN	CN	CN	CN	CN

Pa: pastura, T: trigo, S: soja de primera (1°) o de segunda (2°), Ce: cebada, Gi: girasol, Co: colza, CN: campo natural, Ma: Maíz, Ac: monte de acacia, Euc: monte de plantación de eucalipto, s/d: sin dato.

en CaCl_2 0,01M, durante 20 h a 25°C, se centrifugó y se determinó la concentración de P en el sobrenadante por colorimetría (Murphy y Riley, 1962). La cantidad de P_{75} sorbido se calculó como la diferencia entre la concentración de P agregada en la solución inicial y la remanente en la solución del suelo al finalizar la agitación. Los análisis de laboratorio se realizaron por duplicado promediando los resultados para realizar el análisis estadístico.

Se calcularon el ISP y P_{75} mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{ISP} (\text{mg P kg}^{-1}) = \frac{x}{\log[P]_f} \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$P_{75} (\text{mg P kg}^{-1}) = x \quad (\text{Ecuación 2})$$

donde $x = P$ sorbido en fase sólida (mg P kg^{-1}) al agregar una solución de 75 mg P L^{-1} ; $P_f =$ concentración de P en la solución del suelo, luego de 20 h de equilibrio (mg P L^{-1}).

Se estimó el GSP con las siguientes ecuaciones:

$$\text{GSP}_{P_{75}} (\%) = \text{Bray 1} (P_{75})^{-1} \times 100 \quad (\text{Ecuación 3}) \text{ Ige et al., 2007}$$

$$\text{GSP}_{\text{ISP}} (\%) = \text{Bray 1} (\text{ISP})^{-1} \times 100 \quad (\text{Ecuación 4}) \text{ Ige et al., 2005}$$

donde Bray 1 = P extractable Bray 1 (mg P kg^{-1}); $P_{75} = P$ sorbido (mg P kg^{-1}) al agregar una solución de 75 mg P L^{-1} ; e ISP = índice de sorción de P (mg P kg^{-1}).

Se comprobó la normalidad del pH, del COT, de Bray 1 y de los parámetros de sorción y la homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene (Kuehl, 2006). Los resultados fueron analizados mediante un análisis de varianza con un diseño completamente aleatorizado, con el programa estadístico R Core Team (2013). Para la comparación de medias, en los casos pertinentes se utilizó el test de Tukey. Se consideró que la diferencia entre medias es muy significativa cuando $p < 0,05$ y significativa para $p < 0,1$. Se realizaron análisis de correlación y de regresión lineal para estudiar la relación entre las variables.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El pH, el COT, Bray 1, P_{75} , ISP y $\text{GSP}_{P_{75}}$ y GSP_{ISP} correspondientes a los 5 cm superficiales de los suelos presentaron varianzas homogéneas y una distribución normal.

Al momento del muestreo, el pH varió desde un valor mínimo de 5,8 en el L_7 a un máximo de 6,4 en la L_4 ; no registrándose diferencias significativas ($p = 0,287$) entre manejos (Tabla 2). El pH promedio fue de 6,0 correspondiendo a suelos ligeramente ácidos a neutros.

El contenido de COT fue significativamente superior ($p < 0,001$) en el monte de acacia con presencia de animales en pastoreo durante la época del año más lluviosa, en comparación con el monte de eucalipto, el campo natural y los lotes con producción agrícola o pastura (Tabla 2). La acacia es una especie con una alta producción de

Tabla 2. Valores de pH, carbono orgánico total (COT), P extractable Bray 1, índices de saturación de P (ISP y P_{75}) y grado de saturación de P ($\text{GSP}_{P_{75}}$ y GSP_{ISP}) en el campo natural, pastura, montes y cultivos correspondientes al año 2010.

Table 2. Values of pH, total organic carbon (TOC), extractable P Bray 1, P saturation index (PSI and P_{75}) and degree of P saturation ($\text{GSP}_{P_{75}}$ and GSP_{ISP}) in natural grassland, pasture, forestry and related crops in 2010.

Lote	Manejo	pH	COT	Bray 1	P_{75}	ISP	$\text{GSP}_{P_{75}}$	GSP_{ISP}
			g C kg^{-1}		mg P kg^{-1}		%	
L_1	Cebada-soja	6,0a	31,4c	35,5ab	453,2ab	175,5b	6,8abc	17,8a
L_2	Pastura	6,3a	39,2c	35,6ab	368,0abc	211,4b	9,6abc	16,8a
L_3	Pastura	6,1a	39,0c	33,2ab	349,9bc	175,4b	9,4abc	19,0a
L_4	Avena-soja	6,4a	37,5c	38,1ab	299,1c	239,1ab	14,8ab	20,0a
L_5	Trigo-soja	5,9a	39,1c	55,7a	357,1bc	241,6ab	15,5a	22,7a
L_6	Acacia	5,8a	85,2a	20,2ab	506,1a	322,0a	3,5bc	5,0a
L_7	Eucalipto	5,8a	41,1bc	16,1b	393,3abc	236,8ab	2,8c	4,6a
L_8	Campo natur.	6,0a	54,4b	46,0ab	303,9c	183,5b	14,5abc	24,3a

Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas para cada variable entre sistemas de manejo (Tukey $\alpha = 0,05$).

Different letters within each column indicate significant differences for each variable between management systems (Tukey $\alpha = 0,05$).

biomasa (Schiavo et al., 2009) que está implantada desde aproximadamente 70 años, por lo que se ha realizado una mayor deposición de hojarasca que llevó a un mayor contenido de COT (Mahecha, 2002; Crespo y Fraga 2006), además debido a la actividad ganadera hay un aporte de material orgánico a través de las excretas del ganado vacuno (Uusi-Kämpä et al., 2007). Los valores más bajos de COT se detectaron en los sistemas agrícolas donde las prácticas de manejo condujeron a una incrementada descomposición de la materia orgánica del suelo. No se observaron diferencias significativas en el COT entre los sitios con manejo agrícola-ganadero, con valores entre 31,4 y 39,2 g C kg⁻¹. Estos resultados coinciden con los reportados para la zona por Urquieta (2008). La homogeneidad de los valores en estos sistemas podría estar asociada al manejo conservacionista (siembra directa) que caracterizó a los sistemas agrícola-ganaderos en la última década.

Los valores de P Bray 1 variaron entre un mínimo 16,1 en L₇ y un máximo que alcanzó 55,7 mg kg⁻¹ en L₅. Solo se diferenció significativamente ($p < 0,05$) la rotación trigo-soja (L₅) del monte de eucaliptos (L₇). El mayor valor de P Bray 1 se determinó en la secuencia trigo-soja que presenta 11 años de continuas aplicaciones de P (Tablas 1 y 2) y que fue fertilizado a principios de primavera previo al cultivo de papa. El monte de eucalipto fue el manejo con menor contenido de P extractable Bray 1, debido posiblemente a la extracción realizada durante los 12 años que lleva implantado y a la poca reposición de nutrientes a través de la descomposición de los residuos orgánicos, dado que es una especie de hojas perennes y con baja concentración de P (Schlatter et al., 2006).

En lo que respecta a los índices de sorción de P, correlacionan entre sí ($r = 0,48$; $P = 0,018$). Bache y Williams (1971) sugieren que tanto el ISP como P₇₅ presentan una buena correlación con la pendiente de la isoterma de adsorción ajustada con la ecuación de Temkin, independientemente de la concentración inicial de P en el suelo, y siempre que se adicionen grandes cantidades de P. Sin embargo, cuando se comparan diferentes suelos, puede variar la concentración de P en el equilibrio y no se cumpliría con el principio de comparar sorción a la misma concentración de equilibrio. Los resultados de esta experiencia en la que se utiliza un solo tipo de suelo, sugieren que la utilización de manejos productivos diferentes sería un factor suficiente para modificar la concentración de P en el equilibrio conduciendo a diferencias entre ambos índices de sorción de P. El ISP es una variable afectada significativamente ($p < 0,001$) por el sistema de producción (Tabla 2). Los mayores valores de P₇₅ e ISP, 506,1 mg P kg⁻¹ y 322 mg P kg⁻¹, respectivamente, se registraron en el monte

de acacia (L₆) los cuales se diferenciaron significativamente de los menores correspondientes al manejo agrícola. Para el P₇₅ los menores valores, con promedio de 301,5 mg P kg⁻¹ correspondieron a manejo con rotación cebada soja (L₄) y campo natural (L₈) y el ISP presentó los menores valores para manejos productivos de cebada-soja (L₁), un año de pastura (L₂), tres años de pastura (L₃) y CN (L₈), que en promedio tuvieron un valor de ISP de 186,4 mg P kg⁻¹ (Tabla 2).

Solo el GSP_{P75} presentó diferencias entre manejos productivos (Tabla 2). El suelo estudiado presentó valores de GSP_{P75} entre 2,8% en el monte de acacia (L₇) y 15,5% en el campo natural (L₈), los cuales fueron los únicos que se diferenciaron del resto de los tratamientos ($p < 0,05$). Si bien no se obtuvieron diferencias significativas debidas a los años de agricultura, se evidencia una tendencia a incrementar la saturación del suelo con P en la medida que el manejo incluye más cantidad de años con cultivos agrícolas fertilizados (Tabla 1 y 2). Algunas investigaciones han mostrado que aplicaciones a largo plazo de P incrementan la saturación de P en el suelo (Sharpley, 1996; Börling et al., 2004).

La bibliografía internacional establece un rango de valores de GSP de 20 a 30% a partir del cual existe riesgo ambiental de pérdida de P (Akinremi et al., 2007; Ige et al., 2005) cuando se utiliza para su cálculo el P₇₅ y distintos extractantes de P como Bray, Mehlich, oxalato de amonio u Olsen. Como se observa en la Tabla 2, los valores de GSP_{P75} obtenidos no superan estos límites ni aun cuando se realizaron muchos años de agricultura con agregado de fertilizantes, como es el caso de una larga secuencia agrícola (L₄ y L₅). El GSP_{ISP} y GSP_{P75} están estrechamente relacionados ($r = 0,85$), y en el suelo estudiado, un GSP_{P75} de 20% correspondería a un GSP_{ISP} de 34,1% (Fig. 1), valor que no se alcanzó en este suelo sometido a distintos manejos de cultivos. Considerando la Ecuación 3 para estimar el GSP_{P75/ISP} que relaciona P₇₅ con P Bray 1, se puede inferir que para alcanzar un 20% de GSP_{P75} en un suelo complejo de Argiudol típico y Paleudol petrocálcico los valores de P Bray 1 deberían representar, aproximadamente, una quinta parte del valor de P₇₅. Dado que los valores de P₇₅ se encuentran entre 299,1 y 506,1 mg P kg⁻¹, los valores correspondientes de P Bray 1 que podrían considerarse de riesgo ambiental son los mayores de 59,8 mg P kg⁻¹, respectivamente. En los tratamientos estudiados no se alcanzaron valores de P Bray 1 que puedan presentar actualmente un riesgo ambiental.

Con respecto a la relación entre los parámetros de sorción y las características edáficas, el pH no tuvo correlación ($p = 0,287$) con ninguno de los índices de sorción estimados, posiblemente debi-

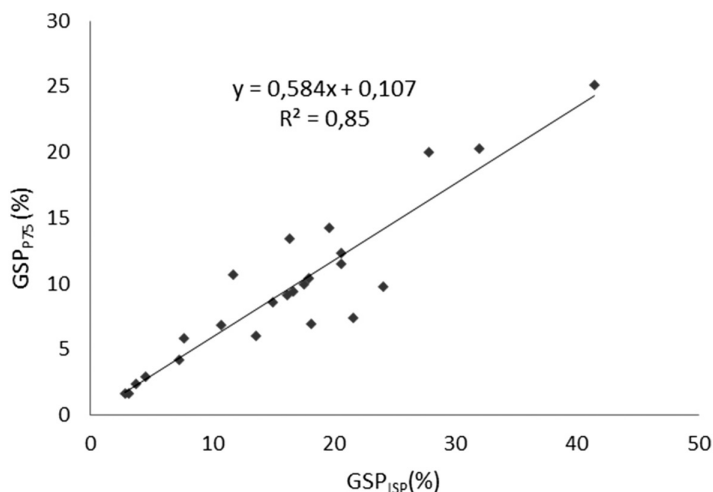


Fig. 1. Relación entre los grados de saturación P (GSP) estimados a partir de P_{75} sorbido y el índice de saturación de P (ISP).

Fig. 1. Relationship between the degree of P saturation (GSP) estimated from P_{75} sorbed and P saturation index (PSI).

do al estrecho rango de pH (Tabla 3). Estos resultados coinciden con lo reportado por Gutiérrez Boem et al. (2008) para molisoles de la provincia de Buenos Aires. Sin embargo, se han determinado en Argiudoles típicos de la pampa ondulada, correlaciones negativas entre ambas variables (Silva Rossi, 2011). El COT presentó correlación positiva y significativa con P_{75} ($P < 0,1$) y una alta correlación positiva y significativa ($p < 0,05$) con el ISP (Tabla 3).

Algunos autores reportaron una correlación positiva de la sorción de P con la materia orgánica (Börling et al., 2001; Ige et al., 2005) y otros, negativa. La asociación positiva entre la adsorción de P y el contenido de MO podría deberse a que el humus provee de sitios con baja energía de retención de P (Johnston, 2000), a la formación de complejos fosfo-humatos (Stevenson y Cole, 1999), al reemplazo de los grupos oxhidrilos de la materia

orgánica por P, o a la asociación de la materia orgánica con cationes como Ca, Fe y Al capaces de adsorber P (Sample et al., 1980). El efecto negativo estaría dado por la competencia de la MO con el P por los sitios de sorción (Daly et al., 2001).

CONCLUSIONES

De la evaluación de los índices de sorción de P surge que P_{75} es más sensible que ISP cuando se comparan sistemas productivos. Los resultados experimentales ponen en evidencia que el GSP_{P75} presenta diferencias significativas entre sistemas productivos mientras que el GSP_{ISP} no sería un indicador adecuado para identificar sistemas productivos diferentes.

En suelos con pH neutro-ligeramente ácido y con actividades productivas extensivas que no provocan cambios significativos de la reacción

Tabla 3. Coeficientes de correlación de Pearson y niveles de probabilidad entre los parámetros de sorción, índices de saturación con P (P_{75} y ISP) y grado de saturación con P y el pH y contenido de carbono orgánico total (COT).

Table 3. Pearson correlation coefficients and probability levels between sorption parameters, P saturation indices (P_{75} and ISP) and degree of P saturation and pH and total organic carbon (TOC).

	pH	COT
P_{75}	$r = -0,25; P = 0,239$	$r = 0,39; P = 0,06$
ISP	$r = 0,06; P = 0,768$	$r = 0,67; P = 0,0003$
GSP_{P75}	$r = 0,14; P = 0,51$	$r = -0,25; P = 0,24$
GSP_{ISP}	$r = 0,06; P = 0,78$	$r = -0,36; P = 0,09$

del suelo, aquellos manejos productivos que favorecen la acumulación de MO también promueven la retención de P. Así, la utilización de labranzas conservacionistas en la producción agrícola, o la incorporación de montes que incluyan especies deciduas, son actividades recomendadas para recuperar las características de sorción de P del suelo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado con fondos del proyecto de la UNMdP AGR 361/11 sobre Cambios en parámetros químicos y bioquímicos del suelo asociados a diferentes sistemas de manejo agrícola-ganadero, y el proyecto de INTA (PE 093002) de Indicadores agroambientales (suelo y agua) para la evaluación de la sustentabilidad de sistemas productivos en áreas sujetas a cambios en el uso de la tierra.

LITERATURA CITADA

- Akinremi, O.O., D.V. Ige, and D.N. Flaten. 2007. Evaluation of the degree of P saturation for assessing the risk of P loss potential in Manitoba soils. A Final Report Submitted to the Manitoba Livestock Manure Management Initiative. The Department of Soil Science. Faculty of Agricultural and Food Sciences. The University of Manitoba, Winnipeg, Canadá.
- Allen, B.L., and A.P. Mallarino. 2006. Relationships between extractable soil phosphorus and phosphorus saturation after long-term fertilizer or manure application. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:454-463.
- Bache, B.W., and E.G. Williams. 1971. A phosphate sorption index for soils. *Journal of Soil Science* 22:289-301.
- Beauchemin, S., R.R. Simard, and D. Cluis. 1998. Form and concentration of phosphorus in drainage waters of twenty-seven tile-drained soils. *J. Environ. Qual.* 25:721-728.
- Bolan, N.S., R. Naidu, S. Mahimairaja, and S. Baskaran. 1994. Influence of low-molecular-weight organic acid on the solubilization of phosphates. *Biol. Fertil. Soils* 18(4):311-319.
- Börling, K., E. Otabbong, and E. Barberis. 2001. Phosphorus sorption in relation to soil properties in some cultivated Swedish soils. *Nutr. Cycling Agroecosyst.* 59:39-46.
- Börling, K., E. Otabbong, and E. Barberis. 2004. Soil variables for predicting potential phosphorus release in Swedish noncalcareous soils. *J. Environ. Qual.* 33:99-106.
- Bray, R.H., and L.T. Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59:39-45.
- Breeuwsma, A., J.G.A. Reijerink, and O.F. Schoumans. 1995. Impact of manure on accumulation and leaching of phosphate in areas of intensive livestock farming. p. 239-249. In K. Steele (ed.) *Animal Waste and the Land-Water Interface*. Lewis Publishers, New York, USA.
- Burgos, J.J., and A. Vidal. 1951. Los climas de la República Argentina según la nueva clasificación de Thornthwaite. *Revista Meteoros* 1(1):3-32.
- Casson, J.P., D.R. Bennett, S.C. Nolan, B.M. Olson, and G.R. Ontkian. 2006. Degree of phosphorus saturation thresholds in manure-amended soils of Alberta. *J. Environ. Qual.* 35:2212-2221.
- Crespo, G. 2006. Avances en el conocimiento del reciclaje de los nutrientes en sistemas silvopastoriles. Memorias. En IV Congreso Latinoamericano de Agroforestería para la Producción Pecuaria Sostenible. III Simposio sobre sistemas silvopastoriles para la producción ganadera sostenible. 24-27 octubre 2006. Centro de Convenciones Plaza América, Varadero, Cuba.
- Daly, K., D. Jeffrey, and H. Tunney. 2001. The effect of soil type on phosphorus sorption capacity and desorption dynamics in Irish grassland soils. *Soil Use Manage.* 17:12-20.
- Dewis, J., and F. Freitas. 1970. Métodos físicos y químicos de análisis de suelos y aguas. p. 36-57. Boletín sobre Suelos N° 10. FAO, Roma, Italia.
- Frangi, J. 1975. Sinopsis de las comunidades vegetales. Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica 16:29-319.
- Gutierrez Boem, F.H., K. Alvarez, M.J. Cabello, and P.L. Fernández. 2008. Phosphorus retention on surface of tilled and no-tilled soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72:1158-1162.
- Herrera, L.P., y P. Látterra. 2011. Relative influence of size, connectivity and disturbance history on plant species richness and assemblages in fragmented grasslands. *Applied Vegetation Science* 14:181-188.
- Igartúa, D.V. 2013. Caracterización xilotecnológica de la madera de *Acacia melanoxylon* R. Br. en el sudeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. 260 p. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina.
- Ige, D.V., O.O. Akinremi, and D.N. Flaten. 2005. Environmental index for estimating the risk of phosphorus loss in calcareous soils of Manitoba. *J. Environ. Qual.* 34:1944-1951.

- Ige, D.V., O.O. Akinremi, and D.N. Flaten. 2007. Direct and indirect effects of soil properties on phosphorus retention capacity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71:95-100.
- Johnston, A. E. 2000. Soil and plant phosphate. 46 p. International Fertilizer Industry Association, Paris, France.
- Karpinets. T.V., D.J. Greenwood, and J.T. Ammons. 2004. Predictive mechanistic model of soil phosphorus dynamics with readily available inputs. *J. Environ. Qual.* 68:644-653.
- Kuehl, R. 2006. Diseño de experimentos. 2a. ed. International Thomson Editores, México D.F.,
- Mahecha, L. 2002. El silvopastoreo: una alternativa de producción que disminuye el impacto ambiental de la ganadería bovina. *Rev. Col. Cienc. Pec.* 15:226.
- Mozaffari, P.M., and J.T. Sims. 1994. Phosphorus availability and sorption in an Atlantic Coastal Plain watershed dominated by intensive, animal-based agriculture. *Soil Sci.* 157:97-107.
- Murphy, J., and J.P. Riley. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta.* 27:31-36.
- Paruelo, J.M., J.P. Guerschman, G. Piñeiro, E.G. Jobbagy, S.R. Veron, G. Baldi, y S. Baeza. 2006. Cambios en el uso de la tierra en Argentina y Uruguay: marcos conceptuales para su análisis. *Agrociencia* 10(2):47-61.
- Pautler, M.C., and J.T. Sims. 2000. Relationships between soil test phosphorus, soluble phosphorus and phosphorus saturation in Delaware soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:765-773.
- Penn, C.J., G.L. Mullins, L.W. Zelazny, and A.N. Sharpley. 2006. Estimating dissolved phosphorus concentrations in runoff from three physiographic regions of Virginia. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:1967-1974.
- Pierzynski G.M., W. Richard, R.W. McDowell, and J.T. Sims. 2005. Chemistry, cycling, and potential movement of inorganic phosphorus in soils. p. 53-86. In *Phosphorus: agriculture and the environment*. Agronomy Monograph N° 46. ASA, CSSA, SSSA., Madison, Wisconsin, USA..
- Pote, D.H., T.C. Daniel, A.N. Sharpley, P.A. Moore, D.R. Edwards, and D.J. Nichols. 1996. Relating extractable soil phosphorus losses in runoff. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60:855-859.
- R Core Team. 2013. R: A language and environment for statistical computing. Versión 3.0.0. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Available at <http://www.R-project.org/> (Accessed 03 April 2013)
- Sample, E.C., R.J. Soper, and G.J. Racz. 1980. Reactions of phosphate fertilizers in soils. p. 263-610. In F.E. Khasawneh, E.C. Sample, and E.J. Kamprath (eds.) *The role of phosphorus in agriculture*. ASA, CSSA and SSSA, Madison, Wisconsin, USA.
- Schiavo, J.A., J. Galba Busato, M.A. Martins, and L.P. Canellas. 2009. Recovery of degraded areas revegetated with *Acacia mangium* and *Eucalyptus* with special reference to organic matter humification. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)* 66(3):353-360.
- Schlatter, J.E., V. Gerding, and S. Calderón. 2006. Aporte de la hojarasca al ciclo biogeoquímico en plantaciones de *Eucalyptus nitens*, X Región, Chile. *Bosque* 27(2):115-125.
- Sharpley, A.N., T.C. Daniel, J.T. Sims, R. Lemunyon, R. Stevens, and R. Parry. 2003. Agricultural phosphorus and eutrophication. 44 p. 2nd ed. U.S. Department of Agriculture (USDA), Agricultural Research Service (ARS), ARS-149. Washington DC, USA.
- Sharpley, A.N. 1996. Availability of residual phosphorus in manured soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60:1459-1466.
- Silva Rossi, M.M. 2011. Adsorción y desorción de fósforo en suelos del área central de la región pampeana. 175 p. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Sims J.T., R.R. Simard, and B.C. Joern. 1998. Phosphorus losses in agricultural drainage: Historical perspective and current research. *J. Environ. Qual.* 27:277-293.
- Stevenson, F.J., and C.V. Cole. 1999. *Cycles of soil: Carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients*. 380 p. John Wiley and Sons, New York, USA.
- Urquieta, J.F. 2008. Nitrógeno potencialmente mineralizable anaeróbico en suelos del sudeste bonaerense y su relación con la respuesta a nitrógeno en trigo. Tesis Ingeniero Agrónomo. Universidad Nacional de Mar del Plata, Balcarce, Argentina.
- USDA Soil Classification. 2006. Claves para la taxonomía de suelos. Soil Survey Staff. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Servicio de Conservación de Recursos Naturales. 10º ed. 331 p. Washington D.C., USA.
- Uusi-kämpä, J., L. Jauhiainen, and A. Huuskonen. 2007. Phosphorus and nitrogen losses to surface water from a forested feedlot for bulls in Finland. *Soil Use and Management* 23:82-91.
- Vadas, P.A., and J.T. Sims. 2002. Predicting phosphorus desorption from Mid-Atlantic Coastal Plain soils. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 66:623-631.
- Walkley, A., and I.A. Black. 1934. An examination

of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37:29-38.

Zhou, M., and Y. Li. 2001. Phosphorus sorption characteristics of calcareous soils and limestone from the Southern Everglades and adjacent farmlands. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:1404-1412.