

CARACTERÍSTICAS DE SORCIÓN DE FÓSFORO DEL SUELO EN UN SISTEMA DE ENGORDE INTENSIVO A CORRAL Y EN UNA PASTURA NATURAL

SOIL PHOSPHORUS SORPTION CHARACTERISTICS IN AN INTENSIVE FINISHING SYSTEM ON A FEEDLOT AND A NATURAL PASTURE

Nélida Pose^{1*}, Ester Zamuner¹, Gustavo Eyherabide¹, Liliana Picone¹, Cecilia Videla¹, y Nestor Maceira²

¹ Universidad Nacional de Mar del Plata, Facultad de Ciencias Agrarias, 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 sistema intensivo de producción de carne vacuna es de interés ambiental, debido al elevado aporte de fósforo (P) al suelo a través de las heces. El objetivo del estudio fue comparar parámetros de isotermas de sorción y grado de saturación de P en suelos bajo pastura y corral para engorde de ganado. Se determinó la capacidad máxima de adsorción de P (X_m) con la isoterma de sorción de Langmuir, la concentración de P en equilibrio cuando la sorción neta de P es cero (EPC), el índice de sorción de P (PSI) mediante isoterma de sorción de punto simple, y el grado de saturación de P del suelo (GSP) empleando X_m o PSI. No se pudo obtener el parámetro de sorción X_m para el suelo del corral de encierre; en el suelo de pastura alcanzó un valor de 357,1 mg P kg⁻¹. El valor de EPC en pastura fue de 0,24 mg P L⁻¹ en relación con 19,18 mg P L⁻¹ en corral. El GSP varió con la metodología utilizada para calcularlo, siendo superior cuando se utiliza el X_m de la ecuación de Langmuir que cuando se utiliza PSI (11,6 % y 7,5% para GSP_{Langmuir} y GSP_{PSI'} respectivamente). El GSP_{PSI} en el corral superó ampliamente al de la pastura (55,7 % y 11,6%, respectivamente). Altos valores de EPC y GSP en el corral de engorde sugieren que estos suelos son vulnerables a pérdidas de P por escurrimiento o lavado.

Palabras clave: grado de saturación, índice de sorción, isotermas de adsorción, concentración de fósforo en equilibrio.

ABSTRACT

The intensive system of beef production is an environmental issue due to the high inputs of phosphorus (P) to the soil through manure. The objective of this study was to compare sorption isotherm parameters and the degree of soil P saturation in soils under pasture and feedlot. P maximum-adsorption capacity (X_m) was determined by Langmuir sorption isotherm, as well as the equilibrium P concentration at zero-net P sorption (EPC), the P sorption index (PSI) by the one-point sorption isotherm, and the degree of soil P saturation (GSP) using X_m or PSI. The X_m sorption parameter could not be obtained for the soil under a feedlot system, but a value of 357.1 mg P kg⁻¹ was obtained for soil under a pasture based system. The EPC value in the soil under pasture was 0.24 mg P L⁻¹, while it reached 19.18 mg P L⁻¹ in the feedlot system. GSP values differed depending on the calculation method used; higher values were obtained when using the X_m of the Langmuir equation compared to values using PSI (11.6% and 7.5% for GSP_{Langmuir} and GSP_{PSI'} respectively). The GSP_{PSI} in feedlot largely exceeded that of the pasture (55.7% and 11.6%, respectively). High values of EPC and GSP in the feedlot suggest that soils under this system are vulnerable to P loss by runoff.

Key words: saturation degree, sorption index, adsorption isotherms, equilibrium phosphorus concentration.

Recibido: 21 agosto 2012. Aceptado: 27 septiembre 2012.

INTRODUCCIÓN

El sistema intensivo de producción de carne vacuna es una práctica que comienza a desarrollarse en la ganadería Argentina, alentada por la necesidad de aumentar el giro del capital hacienda y disminuir el costo financiero, por lo tanto es cada vez más frecuente el engorde a corral, en instalaciones propias o contratadas, como alternativa de alimentación del ganado. Esta actividad ha despertado preocupación con relación al ambiente, ya que debido a la gran cantidad de excretas producida por unidad de superficie se genera un elevado aporte de nutrientes, entre ellos de fósforo (P). Las altas concentraciones de P en el suelo pueden conducir a un potencial riesgo de contaminación de cuerpos de aguas superficiales, y a deteriorar la calidad del agua debido a que estimula la producción de algas y la eutroficación. Numerosas investigaciones ponen en evidencia que aplicaciones continuas de grandes cantidades de estiércol producen acumulación de P extractable y total en el suelo, aumento de la concentración de P en equilibrio cuando la sorción neta de P es cero (EPC), y de P del suelo soluble en agua, estando éste generalmente asociado a pérdidas de P por lavado, erosión o escurrimiento (Zhou y Li, 2001; Kleinman et al., 2002; Pierzynski et al., 2005).

La retención de P por los coloides del suelo es un parámetro importante que permite determinar el destino o fuente de este elemento, lo cual tiene incidencia en el transporte de P y la contaminación del medio ambiente. Cuando el P ingresa al suelo, ocurren reacciones entre éste y los componentes del suelo, de manera que comienza a desaparecer P de la solución. Los procesos de adsorción física y química, precipitación superficial y polimerización, son los responsables en primera instancia de esta disminución de concentración de P en solución (Pierzynski et al., 2005). Todos estos procesos son ejemplos de sorción, término que es usado cuando el mecanismo de retención en la superficie del suelo es desconocido (Sparks, 2003). También han sido denominados en muchos casos y en forma genérica como "fijación o retención de P" (Havlin et al., 2005).

La adsorción de P sobre los minerales del suelo puede ocurrir por medio de mecanismos no específico o específico. En el primer caso los iones ortofosfato, al estar cargados negativamente, son retenidos mediante fuerzas electrostáticas por las cargas positivas de los minerales del suelo (mecanismo de intercambio aniónico). La carga negativa de los suelos a pH > 7 repele a los aniones adsorbidos no específicamente. En la adsorción específica o quimioadsorción ocurre un intercambio de ligando o penetración aniónica. Los iones

H_2PO_4^- o HPO_4^{2-} desplazan a los grupos OH⁻ o H₂O⁺ que están en coordinación con el Fe y Al en la estructura de los óxidos y en los bordes de las arcillas 1:1 formándose complejos de superficie de esfera-interna mono y bidentados o binucleares. Estas reacciones son favorecidas a pH bajos (Havlin et al., 2005). Los factores del suelo que influyen en los procesos de retención de P son: mineralogía, pH, contenido de materia orgánica, contenido de calcio, sales solubles y sodio, óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, capacidad de intercambio catiónico y P nativo (Giuffré de Lopez Camelo, 1989; Ige et al., 2005). El pH ha sido indicado como el factor más importante en la regulación de los procesos de sorción y precipitación de P en el suelo. El tipo de sólidos del suelo que contienen grupos funcionales capaces de generar cargas dependientes del pH incluyen silicatos laminares, óxidos e hidróxidos hidratados y materia orgánica (Havlin et al., 2005; Sparks, 2003).

Las isoterms de adsorción son ampliamente usadas para comparar la capacidad de retención de P de diferentes suelos. Estas isoterms no permiten determinar el mecanismo responsable de la sorción, sin embargo, ofrecen una aproximación adecuada para describir el proceso de retención de P en los suelos (Sparks, 2003). Las ecuaciones más utilizadas para describir el proceso de sorción son las de Langmuir, Freundlich y Temkin (Mendoza, 1986). La ventaja del uso de la isoterma de Langmuir es la posibilidad de emplear la ecuación linearizada para estimar la capacidad máxima de sorción de P (X_m), pero el procedimiento es complejo como para utilizarlo en un análisis de rutina. Como una alternativa, Bache y Williams (1971) propusieron la isoterma de punto simple, con la que se calcula el índice de sorción de P (PSI), que es un medio rápido y simple de estimar la capacidad de sorción de P en un suelo. Esta técnica asume que la adición de 1500 mg P kg⁻¹ de suelo es suficiente para saturar todos los sitios de sorción disponibles (Sims, 2009). Numerosas investigaciones han encontrado que la isoterma de punto simple correlaciona bien con la capacidad de sorción de P determinada a partir de isoterms de sorción completas, en suelos con una amplia variedad de propiedades físicas y químicas (Mozaffari y Sims, 1994; Zhou and Li, 2001).

El grado de saturación de P (GSP) es un índice simple que se desarrolló para cuantificar el riesgo de eutroficación de cuerpos de agua (Breeuwsma et al., 1995), y que permite predecir el potencial del suelo para liberar P que se transportaría por escurrimiento hacia las fuentes superficiales de agua (Pautler y Sims, 2000) o por lavado hacia aguas subterráneas (Nelson et al., 2005). Se pue-

de obtener una caracterización del GSP calculando el cociente entre los valores de P extractable del suelo y la capacidad de sorción de P obtenida a partir de los valores de PSI, o del parámetro X_m de la isoterma de sorción de Langmuir.

En la República Argentina, el manejo tradicional de la producción se realizaba con combinación de actividades agrícolas y producción extensiva de ganado vacuno para carne. Sin embargo, a partir de los años 90, la mayor rentabilidad de la agricultura frente a la ganadería, condujo a la simplificación en los esquemas de rotaciones de cultivos en tierras agrícolas y al incremento de los sistemas de engorde a corral de ganado vacuno. El relativamente nuevo desarrollo de los sistemas de producción ganadera intensiva es la razón por la cual aún no se ha generado suficiente información que permita caracterizarlos adecuadamente y conocer las transformaciones que sufren los nutrientes que son aportados diariamente a través de las excretas. Un claro entendimiento de la dinámica del P en el suelo relacionada con su pérdida potencial hacia los cuerpos de agua, adquiere importancia si la finalidad es desarrollar prácticas de manejo sustentables que preserven el recurso agua, además del suelo y aire.

Los objetivos del estudio fueron: 1) Caracterizar la retención del P en el suelo usando las ecuaciones de Langmuir, Freundlich y Temkin, y 2) Estimar el GSP y el EPC, con el fin de evaluar el riesgo de pérdida de P en el corral de engorde vacuno comparando con una pastura de referencia.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en un campo ubicado en el partido de Balcarce, provincia de Buenos Aires (37°48' S; 58°13' W), Argentina, el cual tiene un sistema de engorde a corral a cielo abierto, de tierra compactada y, una pastura en un radio de 200 m. El suelo clasificado como un complejo con predominio de la serie Chelforó (Natracuol típico) (USDA, 2006), se caracteriza por tener una textura superficial franca, y horizontes franco-arcillosos o arcillosos en profundidad, con características de muy baja permeabilidad debido a su alta concentración de sodio.

Se tomaron muestras compuestas de 15 submuestras, con un calador de suelo con colector, en el corral de engorde, que estaba permanentemente ocupado por animales, con una carga animal que varió entre 0,02 y 0,07 novillos m^{-2} , y en una pastura próxima al corral de engorde, compuesta fundamentalmente por gramíneas, sin animales, y en la que ocasionalmente se hizo heno. Algunas de las propiedades de estas áreas se describen en la Tabla 1.

Las muestras de suelo pertenecientes a los 2,5 cm superiores se secaron al aire y tamizaron por una malla de 0,5 mm. En el caso del corral de engorde la muestra de suelo incluyó la capa de abono y el suelo subyacente. Se realizaron las siguientes determinaciones: carbono orgánico total (COT) medido por el método de Walkley y Black (1934), nitrógeno total (NT) por digestión con ácido sulfúrico en presencia de una mezcla catalizadora (Bremner y Mulvaney 1982), fósforo total (PT) por calcinación y dilución en ácido sulfúrico (Olsen y Sommers 1982), y pH en una relación suelo:agua de 1:2,5. También se realizaron las isotermas de sorción de P completa y de punto simple, y se calcularon el PSI y GSP.

Isoterma completa

Se trataron 2,5 g de suelo de la pastura y del corral con 25 mL de solución de P, con concentraciones de 0; 1; 3; 5; 7; 10; 12; 15; 20; 25; y 30 $mg P L^{-1}$. Las soluciones de P fueron preparadas disolviendo KH_2PO_4 en $CaCl_2$ 0,01 M. Se agitaron diariamente por 5 min, con agitador horizontal (290 rpm) a temperatura constante ($20^\circ C \pm 0,1^\circ C$) durante 10 días. Se separó el sobrenadante y determinó la concentración de P colorimétricamente (Murphy and Riley, 1962).

Isoterma de punto simple

Para la realización de la isoterma de sorción de P de punto simple (Mozaffari y Sims, 1994) se agitaron discontinuamente con agitador horizontal (290 rpm) 2,5 g de suelo con 25 mL de una solución de P conteniendo 150 $mg P L^{-1}$ (KH_2PO_4 en $CaCl_2$ 0,01 M) a temperatura constante ($20^\circ C \pm 0,1^\circ C$), durante 10 días. Este punto representa el agregado de 1500 $mg P kg^{-1}$ de suelo. Se separó el sobrenadante y se cuantificó la concentración de P.

En ambas isotermas, la cantidad de P sorbido se calculó como diferencia entre la concentración de P agregada y la concentración de P remanente en la solución del suelo, luego de los 10 días de contacto.

La concentración de P en todas las soluciones se determinó por colorimetría según el método de Murphy y Riley (1962). Las determinaciones se realizaron por duplicado.

Los valores experimentales de las isotermas de sorción completas se ajustaron mediante las ecuaciones de Langmuir, Freundlich y Temkin (Mendoza, 1986).

Ecuación de Langmuir

$$P_{ads} = kX_m [P]_{eq} (1 + k[P]_{eq})^{-1}$$

Ecuación linealizada:

$$[P]_{eq} P_{ads}^{-1} = (k X_m)^{-1} + [P]_{eq} X_m^{-1}$$

Tabla 1. Contenido de carbono orgánico total, nitrógeno total, fósforo total y pH a 0-2,5 cm de profundidad de los suelos evaluados.**Table 1. Soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus content and pH in the 0-2.5 cm depth of the evaluated soils.**

	COT	NT	PT	pH
		g kg ⁻¹		
Pastura	33,86 b	2,53 b	0,56 b	6,37 b
Corral	73,59 a	7,90 a	1,80 a	7,25 a

COT: carbono orgánico total; NT: nitrógeno total; PT: fósforo total; pH en agua 1:2,5.

Letras distintas en cada columna indica diferencias estadísticas a un nivel de significancia del 5%.

donde:

 P_{ads} : representa el P adsorbido por la fase sólida (mg P kg⁻¹).k: constante relacionada con la energía de adsorción-desorción [L (mg P⁻¹)]. x_m : representa la capacidad máxima de adsorción de P (mg P kg⁻¹). $[P]_{eq}$: es la concentración de P en la solución, en equilibrio (mg P L⁻¹).**Ecuación lineal de Freundlich**

$$\log P_{ads} = \log a + b \log [P]_{eq}$$

donde:

 P_{ads} : representa el P adsorbido por la fase sólida (mg P kg⁻¹).

a: representa la cantidad de P adsorbido por el suelo cuando la concentración de P en la solución es igual a la unidad.

b: representa la afinidad entre el adsorbente y el sorbato.

 $[P]_{eq}$: es la concentración de P en la solución en equilibrio (mg P L⁻¹).**Ecuación lineal de Temkin**

$$P_{ads} = \alpha + \beta \ln [P]_{eq}$$

donde:

 P_{ads} : representa el P adsorbido por la fase sólida (mg P kg⁻¹). α : representa la cantidad de P adsorbido por el suelo cuando $[P]_{eq}$ es igual a la unidad. β : representa la pendiente de la relación P_{ads} versus $\ln [P]_{eq}$. $[P]_{eq}$: es la concentración de P en la solución, en equilibrio (mg P L⁻¹).**Ecuación para cálculo del PSI a partir de la isoterma de sorción de punto simple (Sims, 2009)**

$$PSI \left(\frac{\text{mg P}}{\text{kg}} \right) = \frac{x}{\log [P]_{eq}}$$

donde:

X: P adsorbido por la fase sólida (mg P kg⁻¹) $[P]_{eq}$: P en equilibrio en la solución (mg P L⁻¹).**Ecuaciones para el cálculo del GSP (Pautler y Sims, 2000)**Se determinó el GSP mediante dos métodos: GSP_{PSI} utilizando los valores de PSI obtenidos, y $GSP_{Langmuir}$ a partir del parámetro X_m obtenido de la isoterma de Langmuir, y en ambos casos utilizando P extractable Bray1 (P-Bray).

$$GSP_{PSI} (\%) = P\text{-Bray} [PSI + P\text{-Bray}]^{-1} \times 100$$

$$GSP_{Langmuir} (\%) = P\text{-Bray} [X_m + P\text{-Bray}]^{-1} \times 100$$

Los datos fueron analizados estadísticamente usando el procedimiento GLM del programa SAS (SAS Institute, 1988). Las diferencias entre tratamientos fueron examinadas mediante un análisis de varianza, usando el test de diferencias mínimas significativas (DMS) con un nivel de significancia del 5% para establecer la separación entre medias. Se utilizó análisis de regresión para realizar las ecuaciones de las isotermas de adsorción empleando el programa InfoStat (2002).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN**Características del suelo**El contenido de nitrógeno total (NT) y carbono orgánico total (COT) fueron significativamente mayores ($p < 0,05$) en el corral de engorde del ganado vacuno, reflejando el mayor aporte de nitrógeno (N) y carbono (C) a través de las excretas, respecto a la pastura, que sólo recibió aportes mediante la descomposición de los tejidos vegetales (Tabla 1). Gilley et al. (2008) determinaron el contenido de NT en corral de engorde con valores en el rango de 9,9 a 17,7 g kg⁻¹, dependiendo su variación de la ubicación del corral en la pendiente. Estos valores son superiores al registrado en este trabajo (7,9 g kg⁻¹). Con respecto al COT, se encontraron valores muy inferiores (73,59 g kg⁻¹) a los registrados en otros estudios, que reportaron valores de hasta 213 g kg⁻¹ en los primeros 5 cm de un feedlot (Uusi-Kämpä et al., 2007). El

corral de engorde también registró valores superiores de PT (Tabla 1) asociados principalmente a la contribución de P por parte de las heces (McDowell, 1992). Como es común, el pH del suelo en el corral fue ligeramente alcalino, con una diferencia de aproximadamente 1 unidad de pH con relación a la pastura (Tabla 1). De la excreta animal que retorna al suelo, la mayoría del N está en la orina como urea (Bussink y Oenema, 1998) la cual es rápidamente hidrolizada generando iones hidroxilos (OH^-), además de amonio (Havlin et al., 2005).

Isotermas de sorción de fósforo

En el suelo bajo pastura las ecuaciones de Langmuir, Freundlich y Temkin, permitieron realizar una descripción adecuada del proceso de sorción, ya que presentan altos coeficientes de determinación (R^2), entre 0,89 y 0,99 (Tabla 2). El mayor R^2 (0,99) se obtuvo con la ecuación de Temkin. Esta ecuación puede derivarse de la ecuación de Langmuir, asumiendo que la energía

de sorción decrece linealmente con el aumento de la superficie cubierta, y no tomando en cuenta los valores de sorción muy altos y muy bajos (Mozaffari y Sims, 1994). En un estudio realizado por Giuffré et al. (1984), con un grupo de suelos correspondientes a los ordenes Entisoles, Molisoles y Vertisoles, se informó una tendencia similar en el ajuste de la adsorción de P con la ecuación de Temkin. Mendoza (1986) reportó para un suelo Natraquoll de la provincia de Buenos Aires, que las ecuaciones de Langmuir y Temkin ajustaron adecuadamente los datos de sorción de P. La ecuación de Freundlich ha sido utilizada para estudiar la adsorción de sulfatos en suelos, siendo la más adecuada para la descripción de datos experimentales dado que requiere poca cantidad de puntos para su ajuste (Singh, 1984), y sus coeficientes son usados como índices para caracterizar la sorción (Mendoza, 1986). Sin embargo, sus constantes son de difícil interpretación, debido a que no tienen significado físico ya que son puramente empíricas (Vázquez y Morales, 2000).

Tabla 2. Parámetros de sorción de fósforo de las ecuaciones de Langmuir, Temkin y Freundlich, en las muestras de suelo de la pastura y del corral de engorde.

Table 2. Phosphorus sorption parameters of Langmuir, Temkin and Freundlich equations in the soil samples from the pasture and feedlot.

Suelo	Langmuir			Temkin			Freundlich		
	Xm	K	R ²	α	β	R ²	a	b	R ²
	mg P kg ⁻¹	L (mg P) ⁻¹		mg P kg ⁻¹			mg P kg ⁻¹	L P kg ⁻¹	
Pastura	357,1	0,17	0,89*	52,30	71,75	0,99*	51,30	0,69	0,90*
Corral				-1017,50	365,10	0,56	9,33x10 ⁻⁹	7,36	0,40

* Nivel de significancia de la regresión $P < 0,001$

Xm: representa la capacidad máxima de sorción; K: constante relacionada con la energía de sorción-desorción; α : representa la cantidad de P adsorbido por el suelo cuando $[\text{P}]_{\text{eq}}$ es igual a la unidad; β : representa la pendiente de la relación P_{ads} versus $\ln [\text{P}]_{\text{eq}}$; a: representa la cantidad de P adsorbido por el suelo cuando la concentración de P en la solución es igual a la unidad; b: representa la afinidad entre el adsorbente y el sorbato.

Se decidió emplear la ecuación linealizada de Langmuir para analizar los resultados de esta experiencia, dado que presenta un coeficiente de determinación aceptable ($R^2 = 0,89$), y el parámetro Xm tiene significado físico, ya que puede emplearse para predecir la capacidad máxima de sorción de P. Además, el modelo propuesto por Langmuir ha sido el más utilizado para caracterizar la sorción de P en los suelos (Das et al., 2006).

Como puede observarse en la isoterma de Langmuir correspondiente al suelo bajo pastura (Fig. 1a), la concentración de P en la solución, en el equilibrio, varió entre 0,25 y 11,7 mg P L⁻¹

(obtenidos a partir de soluciones de P entre 3 y 30 mg P L⁻¹ agregadas al suelo), y la capacidad máxima de sorción fue de 357,1 mg P kg⁻¹ (Tabla 2). Al realizar las isotermas con las muestras de suelo del corral de engorde, se agregó también entre 0 y 30 mg P L⁻¹, pero el comportamiento fue distinto según la cantidad de P agregada. Al añadir soluciones que tenían entre 0 y 10 mg P L⁻¹ se produjo desorción de P desde la fase sólida hacia la solución, mientras que entre 10 y 30 mg P L⁻¹ se verificó sorción de P, obteniéndose concentraciones de P en equilibrio (EPC) entre 15 y 23,7 mg P L⁻¹ (Fig. 1b).

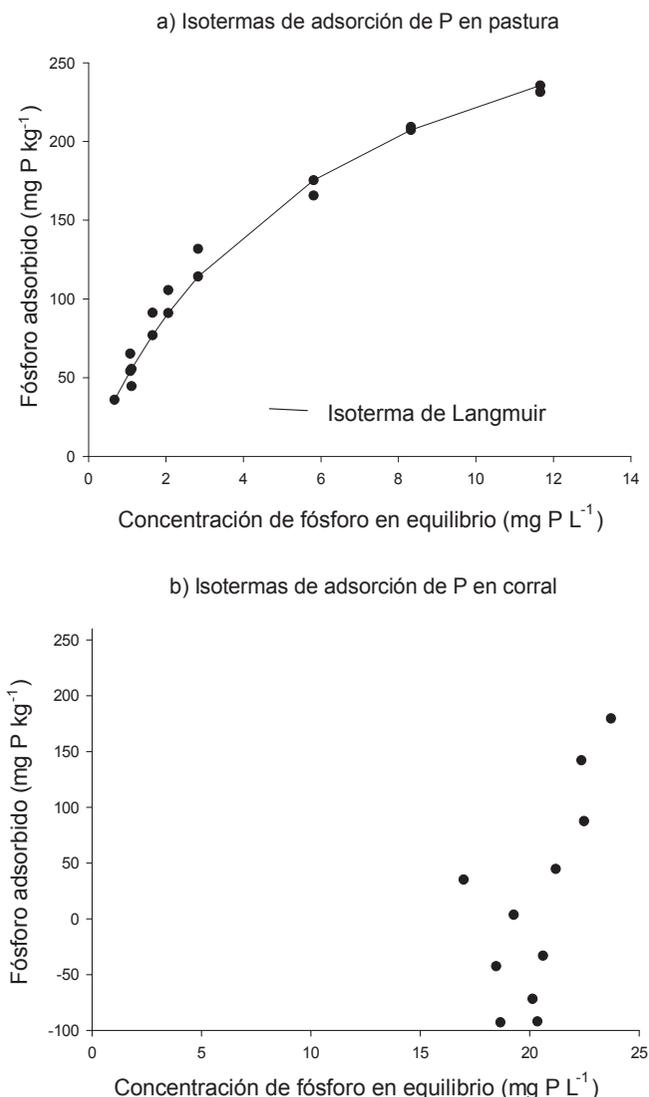


Fig. 1. a) Isotherma de sorción de fósforo (P) en el suelo bajo pastura, ajustada por la ecuación de Langmuir, y b) Isotherma de sorción de fósforo (P) en el suelo del corral de engorde.
Fig. 1. a) Langmuir phosphorus (P) sorption isotherm of the soil under pasture, and b) on feedlot soil.

El corral de engorde presentó menor sorción de P, incluso a concentraciones mayores de P en equilibrio, que la pastura. Cuando se agregaron 30 mg P L⁻¹ se sorbieron 231,4 y 179,6 mg P kg⁻¹ en la pastura y el corral de engorde, respectivamente, quedando en equilibrio en la solución 11,7 mg P L⁻¹ en la pastura y 23,7 mg P L⁻¹ en el corral (datos no mostrados). Esto pone en evidencia la menor capacidad de retención de P de la superficie del corral de engorde donde el 79% del P agregado permaneció en solución con respecto al 39% en la pastura. El pH del suelo tiene una gran influencia en el desarrollo de cargas en los coloides. Al aumentar el pH, se incrementan las cargas negativas de las partículas minerales y la cantidad de un determinado anión que es reteni-

da por el suelo (Havlin et al., 2005). Los ácidos orgánicos provenientes de la degradación de las excretas compiten con el P por los sitios de adsorción, favoreciendo la liberación de P a la solución del suelo (Bolan et al., 1994). El mayor contenido de COT y pH, registrados en suelo del corral de engorde (Tabla 1) serían los responsables de la menor retención de P en corral de engorde respecto del suelo bajo pastura.

De acuerdo a lo propuesto por Havlin et al. (2005), cuando la concentración de P en la solución de equilibrio es baja, el proceso de retención predominante es la adsorción reversible, mientras que con altas concentraciones de P ocurrirían reacciones de precipitación. En el corral de engorde, los valores de concentración de P en equilibrio

obtenidos son en general cercanos a los valores estimados por Quintero et al. (1996) para molisoles de la provincia de Entre Ríos, como límite superior para la región en la cual se cumplen los supuestos de Langmuir, por lo que podrían generarse reacciones de precipitación. Además, la presencia de estiércol en la capa superficial que modifica las propiedades físicas y químicas (Cole et al., 2009) puede limitar la aplicación de las isoterms de adsorción.

Cuando las concentraciones de P en equilibrio son bajas, los datos se pueden ajustar a una isoterma lineal (Fig. 2) cuya intersección con el eje x corresponde a la concentración de P en solución cuando no ocurre adsorción ni desorción neta de P. Este punto se conoce con el nombre de la con-

centración de P en equilibrio cuando la sorción neta de P es cero (EPC) (Hartikainen 1991; Börling, 2003). La EPC depende de las propiedades del suelo, pero también en suelos con enmiendas de P se incrementa significativamente (Sui y Thompson, 2000)

El valor de EPC para la pastura fue de 0,24 mg P L⁻¹ (R² = 0,91; p < 0,012) y para el corral de engorde de 19,18 mg P L⁻¹ (R² = 0,47; p < 0,04). Valores similares fueron reportados por Reddy et al. (1980), quienes registraron para suelos abonados con estiércol de ganado vacuno un EPC de 14 mg P L⁻¹. El mayor EPC en el corral de engorde sugiere que en este sistema el suelo tiende a actuar como fuente de P a muy bajas concentraciones de P en solución, mientras que en la pastura, el suelo puede

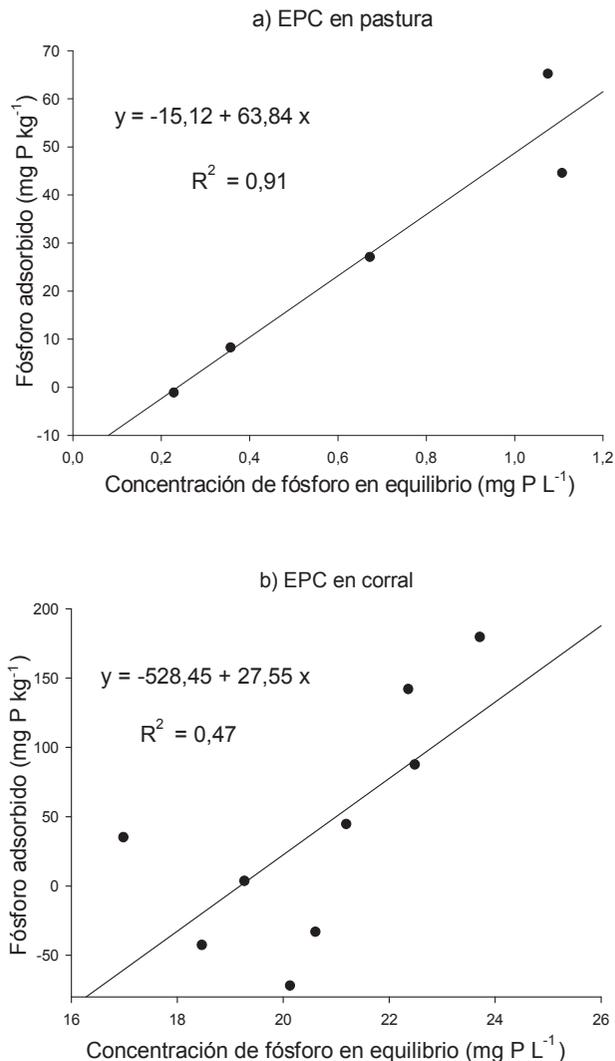


Fig. 2. Isoterma de sorción de fósforo (P) lineal en: a) el suelo de la pastura y b) en el suelo del corral de engorde.

Fig 2. Linear phosphorus (P) sorption isotherm in: a) the pasture soil, and b) the feedlot soil.

actuar como destino del P. Pierzynski et al. (2005) determinaron una correlación significativa entre los valores de EPC obtenidos a partir de las isothermas de sorción y el P soluble en el escurrimiento superficial. Por lo tanto, de acuerdo a esta relación, es de esperar que el sistema de engorde intensivo a corral tenga un mayor riesgo de perder P en el agua de escurrimiento que la pastura.

Usando estas regresiones es posible determinar la capacidad buffer a partir de la pendiente de la recta que es tangente al punto EPC (Fig. 2). La mayor capacidad buffer del suelo bajo pastura en comparación con el corral de engorde sugiere que mucho más P debe ser agregado a suelo bajo pastura que en el corral de engorde, para alcanzar pequeños incrementos en la concentración de P en solución en equilibrio. El mayor EPC concuerda con esta menor capacidad buffer en el suelo del corral de engorde, indicando que el intercambio de P del suelo con el P de la solución ocurre a una mayor concentración de P en la solución en equilibrio, con respecto a la pastura. Los altos valores de P-Bray (promedio 762,7 mg P kg⁻¹), y de P reactivo del suelo soluble en agua (PRS) (promedio 147,2 mg P kg⁻¹) reportados por Wyngaard et al. (2011) y Pose et al. (2010) en el suelo bajo corral de engorde, que son indicadores de P fácilmente desorbible, concuerdan con la baja capacidad buffer de dicho suelo determinada en esta experiencia.

Índice de sorción y saturación de fósforo

El PSI, que estima la capacidad de sorción del suelo, no presentó variaciones significativas ($p > 0,05$) entre el suelo bajo pastura y corral de engorde (Tabla 3), aun cuando se registraron diferencias en propiedades químicas como pH, COT, NT y PT. En promedio, el PSI tendió a ser menor en la pastura que en el corral de engorde (563,9 y 599,9 mg P kg⁻¹, respectivamente). Este resultado

podría deberse, en parte, a que la alta concentración de P agregada (1500 mg P kg⁻¹ de suelo) haya generado reacciones de precipitación de P, especialmente en muestras que ya presentaban altas concentraciones de Bray o PRS.

Con los valores de P-Bray, PSI, y X_m de la isoterma de Langmuir se calcularon los valores de GSP_{Langmuir} y GSP_{PSI} para la pastura (Tabla 3). Como puede observarse, el GSP varía con la metodología utilizada para calcularlo. Es superior cuando se utiliza el valor X_m de la ecuación de Langmuir que cuando se utiliza PSI (11,6 % y 7,5% para GSP_{Langmuir} y GSP_{PSI}, respectivamente). En el corral de engorde solo se pudo calcular el GSP_{PSI}. El GSP calculado en base al PSI que presenta el suelo del corral de engorde es claramente superior, aproximadamente siete veces mayor (55,7%), que el registrado en el suelo bajo pastura (7,5%). Laboski et al. (2004) encontraron que cuando la presencia de heces de ganado genera un aumento de GSP superior al 26%, se reduce la capacidad de sorción de P. En estas condiciones el P se encuentra menos fuertemente retenido y más susceptible de ser transportado; mientras que cuando el P extractable Bray es mayor a 60 mg P kg⁻¹ ocurre un aumento del PRS y se incrementa el riesgo de afectar la calidad de agua. Los altos valores de P-Bray y PRS (Tabla 3) obtenidos para el corral de engorde junto con los de GSP_{PSI} coinciden con lo indicado por Laboski et al. (2004). Zhou y Li (2001) encontraron que suelos con altos valores de GSP registraban también elevados valores de EPC, y por consiguiente un alto potencial de pérdida de P.

Dado que la complejidad de las medidas de saturación pueden ser simplificadas usando la isoterma de punto simple, en lugar de la isoterma de Langmuir, el GSP_{PSI} sería una alternativa útil, fácil y rápida como predictor de la liberación po-

Tabla 3. Contenido de fósforo extractable Bray (P-Bray), coeficiente de máxima adsorción de la ecuación de Langmuir (X_m), índice de sorción de fósforo (PSI) y grado de saturación de fósforo (GSP).

Table 3. Content of Bray-extractable phosphorus (P-Bray), maximum adsorption coefficient of the equation of Langmuir (X_m), phosphorus sorption index (PSI) and degree of phosphorus saturation (GSP).

Suelo	PSI	P-Bray*	X _m	GSP _{Langmuir}	GSP _{PSI}
	-----	mg P kg ⁻¹	-----	----- %	-----
Pastura	563,9 a	46,8 b	357,1	11,6	7,5 a
Corral	599,9 a	782,7 a			55,7 b

GSP_{Langmuir}: grado de saturación de P a partir de P-Bray y X_m.

GSP_{PSI}: grado de saturación de P a partir de P-Bray y PSI.

*Los valores de P-Bray corresponden a Wyngaard et al. (2011) y Pose et al. (2010)

tencial de P, tanto en suelos bajo pastura como en un corral de engorde de ganado vacuno.

CONCLUSIONES

En el suelo bajo pastura las ecuaciones de Temkin, Freundlich y Langmuir permitieron realizar la descripción adecuada del proceso de adsorción, no así en el suelo del corral de engorde. Por lo tanto, la realización de isotermas de sorción de P, en las condiciones evaluadas no es una herramienta válida para comparar las características de retención de P de ambos suelos.

El GSP solo pudo calcularse para ambos suelos, cuando se lo obtuvo a partir del PSI y P-Bray. Se determinaron valores mayores de GSP_{PSI} y de EPC, en el corral de engorde que en la pastura, lo que sugiere que la superficie del corral de engorde es más vulnerable a la pérdida de P que el suelo bajo pastura.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado con fondos del proyecto de la UNMdP AGR 361/11 "Cambios en parámetros químicos y bioquímicos del suelo asociados a diferentes sistemas de manejo agrícola-ganadero" y al proyecto de INTA PE 093002 "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

Alvarez, V. H. 1982. Efecto de los factores cantidad, intensidad y capacidad amortiguadora de fosfato en la evaluación del fósforo disponible de suelos derivados de cenizas volcánicas de la meseta de Tarasca, Estado de Michoacán. 300 p. Tesis de doctorado. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.

Bolan, N.S., R. Naidu, S. Mahimairaja, and S. Bakaran. 1994. Influence of low-molecular-weight organic acid on the solubilization of phosphates. *Biol. Fertil. Soils* 18(4):311-319.

Börling, K. 2003. Phosphorus sorption, accumulation and leaching. Effects of long-term inorganic fertilization of cultivated soils. 39 p. Doctoral thesis. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden.

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.

Bremner, J.M., and C. Mulvaney. 1982. Nitrogen total. p. 595-624. In A. Page (ed.). *Methods of soil analysis. Part 2. Microbiological and biochemical properties*. Agronomy 9. 2nd. ed. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.

Bussink, D.W., and O. Oenema. 1998. Ammonia volatilization from dairy farming systems in temperate areas: A review. *Nutr. Cycling Agroecosyst.* 51:19-33.

Cole, N.A., A.M. Mason, R.W. Todd, M. Rhoades, and D.B. Parker. 2009. Chemical composition of pen surface layers of beef cattle feedyards. *Professional Animal Scientist* 25(5):541-552.

Das, J., B.S. Patra, N. Baliarsingh, and K.M. Parida. 2006. Adsorption of phosphate by layered double hydroxides in aqueous solutions. *Applied Clay Science* 32(3-4):252-260.

Gilley, J.E., E.D. Berry, R.A. Eigenberg, D.B. Marx, and B.L. Woodbury. 2008. Spatial variations in nutrient and microbial transport from feedlot surfaces. *Trans. of the ASABE* 51(2):675-684.

Giuffré de Lopez Camelo, L, O.S. Heredia, A. Nervi, and Z.M.M. De Sesé. 1984. Adsorción de P en algunos suelos argentinos. I. Condiciones experimentales e isotermas de adsorción. *Rev. Fac. Agron. UBA* 5:165:174.

Giuffré de Lopez Camelo, L. 1989. Indices de sorción de P y su relación con algunas propiedades de los suelos. *Ciencia del Suelo*. 7(1-2):43-50.

Hartikainen, H. 1991. Potential mobility of accumulated phosphorus in soil as estimated by the indices of Q/I plots and by extractant. *Soil Science* 152:204-209.

Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale, and W.L. Nelson. 2005. *Soil fertility and fertilizers. An introduction to nutrient management*. Pearson Education Inc., Upper Saddle River, New Jersey, USA.

Ige D.V., O.O. Akinremi, D.N. Flaten, B. Ajiboye, and M.A. Kashem. 2005. Phosphorus sorption capacity of alkaline Manitoba soils and its relationship to soil properties. *Canadian J. Soil. Sci.* 85:417-426.

InfoStat. 2002. *InfoStat/Profesional Version 1.1*. Grupo InfoStat. 216 p. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

Kleinman, P.J.A., A.N. Sharpley, A.M. Wolf, D.B. Beegle, and P.A. Moore. 2002. Measuring water-extractable phosphorus in manure as an indicator of phosphorus in runoff. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:2009-2015.

Laboski, Carrie A.M., and J.A. Lamb. 2004. Impact of manure application on soil phosphorus sorption characteristics and subsequent water quality implications. *Soil Science* 69(6):440-

- 448.
- McDowell, L.R. 1992. Minerals in animals and human nutrition. 542 p. Academic Press, San Diego, California, USA.
- Mendoza R. E. 1986. Isotermas de adsorción de fósforo en suelos argentinos: I. Métodos de ajuste y comparación entre ecuaciones. *Ciencias del Suelo* 2:107-116.
- 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.
- Nelson, N. O., J.E. Parsons, and R.L. Mikkelsen. 2005. Field-scale evaluation of phosphorus leaching in acid sandy soils receiving swine waste. *J. Environ. Qual.* 34:2024-2035.
- Olsen, S.R., and F.E. Khasawneh. 1980. Use and limitations of physical-chemical criteria for assessing the status of phosphorus in soils. p. 361-410. In F.E. Khasawneh, E.C. Sample and E.J. Kamprath (eds.). *The role of phosphorus in agriculture*. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
- Olsen, S.R., and L.E. Sommers. 1982. Phosphorus. p. 403-427. In A. Page (ed.). *Methods of soil analysis. Part 2. Agronomy* 9. 2nd. ed. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
- Pautler, M.C., and T.J. Sims. 2000. Relationships between soil test phosphorus, soluble phosphorus and phosphorus saturation in Delaware soils. *J. Soil Sci.* 64:765-773.
- Pierzynski G.M., R.W. McDowell, and T. Sims. 2005. Chemistry, cycling, and potential movement of inorganic phosphorus in soils. p. 53-86. In J.T. Sims and A.N. Sharpley (eds.), *Phosphorus, agriculture and the environment*. Am. Soc. Agron. Monograph. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
- Pose N., E. Zamuner, G. Eyherabide, L. Picone, C. Videla, N. Wyngaard, y N. Maceira. 2010. Métodos de determinación del grado de saturación de fósforo en un suelo del sudeste bonaerense. En XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario. 31 de mayo al 4 de junio de 2010. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo, Rosario, Argentina.
- Pote, D.H., T.C. Daniel, D.J. Nichols, A.N. Sharpley, P.A. Moore Jr., D.M. Miller, and D.R. Edwards. 1999. Relationship between phosphorus levels in three ultisols and phosphorus concentrations in runoff. *J. Environ. Qual.* 28:170-175.
- Reddy, K.R., M.R. Overcash, R. Khaleel, and P.W. Westerman. 1980. Phosphorus adsorption-desorption characteristics of two soils utilized for disposal of animal wastes. *J. Environ. Qual.* 9:86-92.
- SAS Institute. 1988. *User's Guide. Statistics, V. 5*. SAS Institute, Cary, North Carolina, USA.
- Sparks, D.L. 2003. *Environmental soil chemistry*. 352 p. Academic Press, San Diego, California, USA.
- Sims, J. T. 2009. A phosphorus sorption index. p. 20-22. In J.L. Kovar and G.M. Pierzynski (eds). *Methods for P Analysis*. Southern Cooperative Series Bulletin No. 408. Virginia Tech University, Blacksburg, Virginia, USA.
- Sims, J.T., and G.M. Pierzynski. 2005. Chemistry of phosphorus in soils. p. 151-192. In M.A. Tabatabai, and D.L. Sparks. *Chemical processes in soils*. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.
- Singh, B.R. 1984. Sulfate sorption by acid forest soils. 1. Sulfate adsorption isotherms and comparison of different adsorption equations in describing sulfate adsorption. *Soil Sci.* 138:189-197.
- Sui Y. and M.L. Thompson. 2000. Phosphorus sorption, desorption, and buffering capacity in a biosolids-amended Mollisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:164-169.
- USDA. 2006. *Claves para la taxonomía de suelos*. 10ª. ed. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS), Washington D.C., USA.
- Uusi-Kämpä, J. 2002. Nitrogen and phosphorus losses from a feedlot for suckler cows. *Agricultural and Food Science in Finland* 11:355-369.
- Uusi-Kämpä, J., L. Jauhainen, 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.
- Vásquez, S., y L. Morales. 2000. Adsorción de fósforo por suelos ácidos de Misiones (Argentina). *Ciencia del Suelo* 18(2):89-94.
- 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.* 5:1404-1412.
- Wyngaard, N., L.I. Picone, C.C. Videla, E. Zamuner, y N. Maceira. 2011. Impact of feedlot on soil phosphorus concentration. *Journal of Environmental Protection* 2:280-286.