

ADSORCION DE FOSFORO POR SUELOS ACIDOS DE MISIONES (ARGENTINA)

S VAZQUEZ, LA MORALES

Cátedra de Edafología F. C. A. UNNE, Sargento Cabral 2131 3400 Corrientes Argentina. E-mail: lam@agr.unne.edu.ar

Recibido 3 de octubre de 1999, aceptado 25 de octubre de 2000.

PHOSPHORUS ADSORPTION BY ACID SOILS FROM MISIONES (ARGENTINA)

Phosphorus deficiency in acid soils is related to soil ability to fix this element through adsorption and precipitation reactions. In order to select the best mathematical model for phosphorus adsorption in soils from Misiones (Argentina), A horizons samples from seventeen different soils were analyzed. Adsorption isotherms were determined by Fox and Kamprath method. Data were performed by Langmuir and Freundlich equations, and by a combined model of Langmuir - Freundlich, that resulted the best one. According to the Langmuir - Freundlich the different soils could be grouped into very high, high, medium and low phosphorus adsorption capacity. The K_{ds} coefficient of combined model Langmuir - Freundlich were negatively related with loam, Ca, Sums of bases, and total P, and positively with aluminum-oxalate.

Key words: phosphorus-adsorption-acid soil.

INTRODUCCION

Una de las principales limitantes en la producción de cultivos en Misiones es la baja disponibilidad de fósforo (P) en Oxisoles, Ultisoles y Alfisoles predominantes, a pesar del alto contenido de P total (Vazquez *et al.* 1998). En suelos ácidos como los de Misiones la adsorción de P está generalmente atribuida a los óxidos e hidróxidos de Fe y Al y a otras propiedades del suelo. Este fenómeno ha sido estudiado a través de isotermas de adsorción ajustadas a modelos matemáticos como los de Langmuir o Freundlich, ya sea para comprender la dinámica del P en distintos sistemas como para utilizarlas como diagnóstico para el requerimiento de fertilizantes. Varios autores encontraron mejor ajuste con la ecuación de Freundlich que con la de Langmuir (Yuan Lucas 1982, Sanyal *et al.* 1993, Zhou *et al.* 1997), especialmente a altas concentraciones de P en solución de equilibrio. Mendoza (1986) trabajando con Oxisoles de Misiones determinó que la ecuación de Freundlich fue superior a las de Langmuir y Temkin, ya que estas subestimaban la adsorción en concentraciones bajas y altas y sobrestimaban en valores medios. En nuestro país se han usado distintas ecuaciones para las diferentes regiones (Giuffrè de López Camelo *et al.* 1984, Mendoza 1986, Buschiazzo *et al.* 1990

Quinteros *et al.* 1996) pero, para algunos suelos de Misiones los modelos propuestos no permiten una descripción adecuada de la adsorción de P. El fracaso de los modelos de simple reacción para describir adecuadamente la retención y particularmente la lenta liberación de solutos originó el desarrollo de modelos de múltiples sitios de reacción, siendo uno de ellos el modelo de dos superficies de Langmuir desarrollado por Sposito (1982). Shen *et al.* (1997) propusieron, para las isotermas de adsorción total de $\text{NH}_4^+\text{-K}^+$, un modelo similar al de Langmuir de dos superficies combinando las ecuaciones de Langmuir-Freundlich. En esta combinación la parte correspondiente a la ecuación de Langmuir explicaría los primeros estados de la adsorción mientras que, la correspondiente a Freundlich, los estados avanzados después que la de Langmuir ha alcanzado el máximo estado de equilibrio.

Borggaard *et al.* (1990) encontraron que la máxima adsorción de P fue correlacionada significativamente con óxidos de Fe y Al poco cristalizados. Sanyal *et al.* (1993) obtuvieron una relación positiva de la adsorción máxima de Langmuir con el Fe-Al extraído en oxalato, el Al reactivo, la arcilla y el contenido de materia orgánica y, una correlación negativa, con el pH y el P-Bray 2. Un comportamiento

similar tuvo el parámetro K de la ecuación de Freundlich. Yuan, Savkulich (1994) no observaron correlación entre los parámetros de sorción y el Fe-ditionita, Fe-oxalato y el total de carbono orgánico. Freese *et al.* (1992) propusieron que el P orgánico, que representa el P originalmente adsorbido por los óxidos e hidróxidos amorfos de Fe y Al, debería ser tomado en cuenta en los modelos de adsorción. Sanyin *et al.* (1990) trabajando con suelos arcillosos, llegaron a la conclusión que la mayor sorción de P por la fracción limo se debería a la presencia en ese tamaño de partículas de Fe amorfo o ligeramente cristalino.

El objetivo del presente trabajo fue seleccionar el modelo matemático que mejor ajuste la adsorción de P en suelos de Misiones (Argentina) y establecer si existen relaciones entre las variables edáficas que la determinan y los parámetros de adsorción, que se obtienen de los modelos matemáticos aplicados.

MATERIALES Y METODOS

En Misiones se tomaron diecisiete muestras de suelo del horizonte A de pedones de distintos orígenes y bajo diferentes condiciones de manejo. La clasificación y propiedades de los mismos se detallan en la Tabla 1. Se determinó el contenido de arcilla, limo y arena por el método densimétrico de Bouyoucos. El pH fue medido en suspensión suelo agua 1:2.5; el carbono orgánico (CO) fue analizado por el método de Walkley-Black, Fe y Al (Fe_{ox} , Al_{ox}) fueron extractados con solución de oxalato de amonio (pH = 3) por 2 hs. (Loeppert *et*

al. 1996) y los contenidos de Fe y Al fueron determinados por espectrofotometría de absorción atómica. El Al, acidez y bases intercambiables (Al_{int} , Ac_{int} y S_{int}) fueron desplazados con solución acuosa 1 mol dm^{-3} de NaCl. Se determinaron los contenidos de Al_{int} y Ac_{int} por titulación. Los contenidos de P total (PT) y el P orgánico (PO) se obtuvieron empleando la metodología de Bowman (1989). El P disponible fue extractado con Bray 2 y Olsen (Kuo 1996).

Las isoterms de adsorción se determinaron de acuerdo al método de Fox y Kamprath (1970): se equilibraron 5 g de muestra pasada por tamiz de 2 mm (por triplicado) en 50 mL de $CaCl_2$ 0,01M, conteniendo 0, 40, 80, 160, 240, 320, 400, 480, 560 y 640 $mg P kg^{-1}$ de KH_2PO_4 durante 6 días y se almacenaron en cámara climática a 25°C. Cada muestra recibió tres gotas de tolueno para inhibir el crecimiento de microorganismos. Las muestras fueron agitadas durante 30 minutos, dos veces por día, en un agitador horizontal a 180 rpm. El P se determinó colorimétricamente por el método de Murphy y Riley (Kuo 1996). La diferencia entre las concentraciones de P agregado y P remanente en la solución de equilibrio fue considerada como el P adsorbido. Los datos del P adsorbido por unidad de peso (X, $mg kg^{-1}$) y las concentraciones de P en la solución de equilibrio (C, $mg L^{-1}$) se ajustaron con las siguientes ecuaciones:

Ecuación de Langmuir:

$$X = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot C}{1 + k_1 \cdot C}$$

donde k_1 ($mg L^{-1}$) es la constante de afinidad y k_2 ($mg kg^{-1}$) máxima adsorción.

Tabla 1. Características físicas y químicas de los suelos estudiados.
Table 1. Physical and chemical characteristics of the soils under study.

Suelo	pH	CO	g kg^{-1}				Fe_{ox}	Al_{ox}	mg kg^{-1}				Al_{int} cmol $c kg^{-1}$		
			Arena	Limo	Arcilla	P-Olsen			P-Bray 2	PT	PO	Ca	Ac_{int}	Al_{int}	
Kandiudalf Ródico	4.42	15.5	295	156	549	0.62	2.51	1.47	1.50	371	78	5.64	2.60	7.6	1.82
Kandiudalf Ródico	4.78	11.6	228	100	672	0.68	2.75	1.52	0.62	404	60	3.51	5.80	5.0	4.16
Kandiudalf Ródico	4.80	11.0	222	126	652	0.65	2.92	1.55	0.48	369	98	3.34	5.00	5.1	3.81
Kandiudalf Mólico	5.00	6.8	137	225	638	0.55	1.01	3.45	2.80	704	99	6.19	1.35	12.0	0.67
Kandihumult Típico	4.86	23.7	135	262	603	0.52	2.15	3.01	4.83	996	179	8.42	1.01	11.4	0.56
Eutrudox Ródico	5.17	11.7	122	194	684	0.51	1.61	2.15	1.50	675	179	5.98	1.30	7.2	0.83
Eutrudox Ródico	4.98	12.1	136	152	712	0.53	2.09	2.05	1.34	652	144	5.03	2.60	6.4	1.81
Eutrudox Ródico	5.14	10.5	136	134	730	0.54	2.14	1.91	1.35	564	99	5.53	1.03	7.8	0.58
Hapludalf Ródico	5.30	16.0	130	204	666	0.99	2.21	2.25	0.86	502	162	8.29	0.54	11.0	0.30
Hapludalf Ródico	5.16	16.4	119	127	754	1.10	2.15	2.43	1.76	493	133	7.58	0.95	9.8	0.59
Hapludalf Ródico	5.20	15.1	87	225	688	1.18	2.32	2.29	1.57	510	107	8.24	0.79	10.3	0.52
Hapludox Típico	4.51	15.5	96	196	708	0.57	3.04	2.74	4.16	626	158	3.01	7.93	4.2	6.26
Hapludox Típico	4.48	16.6	94	196	710	0.46	3.46	3.84	4.61	613	169	3.02	8.38	4.1	8.37
Kandihumult Típico	4.45	16.5	133	197	670	0.50	2.91	3.20	2.88	702	137	3.26	7.67	4.3	6.32
Kandihumult Típico	4.48	16.6	134	203	663	0.51	2.87	2.23	3.59	691	166	3.22	7.47	4.4	5.84
Hapludox Húmico	4.41	14.5	105	130	765	0.43	2.75	2.26	2.90	608	161	2.86	7.97	3.8	6.45
Hapludox Húmico	4.41	14.6	42	177	781	0.45	2.21	3.10	3.12	602	168	3.55	8.39	4.4	6.87

Tabla 2. Parámetros de equilibrio de los tres modelos de adsorción de P.
Table 2. Equilibrium parameters determined for the three models of P adsorption.

Tipo de adsorción	Suelo	Freundlich		Langmuir		Dos Superficies					
		K mg ^{1-1/n} L ^{1/n} kg ⁻¹	n	k ₁ ngL ⁻¹	k ₂ ng P kg ⁻¹	†	is	2 ds	†	is	2 ds
Muy Alta	Kandiudalf Ródico	761	0.28	77.1	582	574	142.2	422	280	0.60	699
	Kandiudalf Ródico	782	0.30	40.3	600	585	79.4	412	318	0.66	725
Alta	Kandiudalf Ródico	468	0.28	12.4	528	489	232.0	200	255	0.55	455
	Hapludox Típico	407	0.34	3.8	581	460	35.5	176	233	0.52	404
	Hapludox Típico	418	0.33	4.1	584	468	59.1	133	284	0.45	416
	Kandihumult Típico	399	0.32	3.5	580	452	53.7	221	174	0.62	391
	Kandihumult Típico	378	0.32	3.3	568	436	67.5	159	216	0.51	372
	Hapludox Húmico	449	0.36	3.0	645	485	59.7	180	264	0.57	441
	Hapludox Húmico	454	0.33	5.7	585	498	25.1	250	216	0.55	456
	Kandihumult Típico	230	0.42	0.6	637	227	0.4	473	102	0.28	225
	Eutrudox Ródico	278	0.29	1.5	521	311	56.2	62	219	0.34	281
	Eutrudox Ródico	308	0.30	1.6	560	346	35.4	80	235	0.36	313
Media	Eutrudox Ródico	291	0.30	1.6	536	328	130.4	73	218	0.37	291
	Hapludalf Ródico	235	0.34	0.7	559	223	77.9	91	144	0.47	234
	Hapludalf Ródico	288	0.32	1.4	552	320	52.6	62	229	0.37	290
	Hapludalf Ródico	267	0.34	1.0	563	288	22.1	84	190	0.43	270
Baja	Kandiudalf Mólico	164	0.36	0.5	472	148	3.1	107	93	0.46	174

† P adsorbido, estimado a una concentración de 1 mg L⁻¹ en la solución de equilibrio.

Ecuación de Freundlich:

$$X = K \cdot C^n$$

donde K (mg^{1-1/n} L^{1/n} kg⁻¹) y n son constantes. La constante K puede ser considerada como un índice del P adsorbido de una solución que tiene una concentración unitaria de P en el equilibrio e indica la capacidad relativa de adsorción P por distintos suelos.

Ecuación combinada Langmuir - Freundlich:

$$X = \frac{k_{1ds} \cdot k_{2ds} \cdot C}{1 + k_{1ds} \cdot C} + K_{ds} \cdot C^{n_{ds}}$$

donde k_{1ds}, k_{2ds}, K_{ds} y n_{ds} son constantes de las ecuaciones simples.

Se utilizó el procedimiento no lineal para la estimación de las constantes (SAS Inst. 1986). Se analizaron por regresión lineal simple las relaciones entre los coeficientes de la ecuación de mejor ajuste con las variables del suelo.

RESULTADOS Y DISCUSION

En general la ecuación de Freundlich produjo los mejores ajustes del P adsorbido, menor suma de cuadrados residuales que la de Langmuir, especialmente a altas concentraciones de P en la solución de equilibrio, concordando con lo encontrado por varios autores (Giuffré de López Camelo *et al.* 1984, Polyzopoulos *et al.* 1985, Mendoza 1986, Ratkowsky 1986, Sanyal *et al.* 1993). Esto se debería a que la ecuación de Freundlich tiene

en cuenta la disminución de la afinidad a medida que aumenta la saturación en la superficie, por lo que presenta mejor ajuste. En la mayoría de los suelos estudiados, a bajas concentraciones, el modelo de Langmuir presentó un mejor comportamiento, no así para las concentraciones medias y altas en forma similar a lo encontrado por Mendoza (1986). El modelo combinado presenta la ventaja de un mejor ajuste de los valores experimentales comparado con los de las ecuaciones de Freundlich y Langmuir, para todo el rango de concentraciones. En la Tabla 2 se muestran los valores de la constante de afinidad (k₁) y de máxima adsorción (k₂) de Langmuir y la capacidad relativa de adsorción de P (K) de Freundlich. Se puede observar una amplia variación para k₁ y K. El coeficiente k₂ presentó valores más uniformes, alcanzando 645 mg P kg⁻¹ de máxima adsorción. Esta cantidad sobrepasa el rango de concentraciones experimentales. Teniendo en cuenta los valores K de la ecuación de Freundlich y las curvas de sorción de cada uno de los suelos estudiados, se pueden agrupar los mismos en cuatro tipos: muy alta, alta, media y baja adsorción, coincidiendo las primeras categorías con curvas del tipo H y las dos últimas con las del tipo L (Sposito 1984). Al estimarse el P sorbido con el modelo de Langmuir y el de Langmuir - Freundlich, a una concentración

Tabla 3. Coeficientes de regresión no lineal, R² y suma de cuadrados residuales (SCR) de los modelos estudiados
Table 3. Regression coefficients no lineal, R² and residual sums of square (RSS) of studied models.

Tipo de adsorción	Langmuir				Freundlich			Langmuir y Freundlich						
	k ₂	k ₁	R ²	SCR	K	1	R ²	SCR	ζ _{2 ds}	1 ds	K _{ds}	n _{ds}	R ²	SCR
Muy Alta	586.2	56.6	0.987	9895	768.8	0.282	0.995	25377	399.4	112.0	316.1	0.591	0.995	1534
Alta	579.4	4.356	0.975	24101	421.8	0.316	0.990	4365	141.4	49.2	284.2	0.418	0.992	1282
Media	549.2	1.149	0.979	13487	272.4	0.318	0.992	1553	37.1	60.6	236.9	0.351	0.992	1540
Baja	471.8	0.456	0.989	8102	164.1	0.357	0.998	900	106.8	3.1	93.3	0.459	0.999	183

en la solución de equilibrio de 1 mg L⁻¹, se obtuvo un agrupamiento de los suelos semejante a los obtenidos con la K de Freundlich (Tabla 2) ya que la misma representa la cantidad adsorbida cuando la concentración de equilibrio es unitaria. Con los datos experimentales de los suelos comprendidos en cada clase se estimaron nuevamente los coeficientes para los tres modelos. Tomando como criterio de selección la menor suma de cuadrados residuales, se seleccionó el modelo de dos superficies como el de mejor ajuste (Tabla 3). Las curvas de adsorción, calculadas con la ecuación combinada de Langmuir - Freundlich, con los valores promedios de cada punto experimental de cada grupo de suelo se presentan en la Figura 1.

Habiéndose seleccionado el modelo combinado, se correlacionaron sus coeficientes con

las variables de suelo. El coeficiente k_{2ds}, que representaría la capacidad máxima de adsorción no correlacionó con ninguno de los parámetros de los suelos analizados. Esta falta de correlación indicaría que ninguno de ellos por sí solo podría explicar esta propiedad. El coeficiente K_{ds} que mide el grado de saturación de los sitios de adsorción, se correlacionó negativamente al nivel de probabilidad a £ 0.01 n = 17 con el limo (0.76), Ca (0.62), suma de bases (0.72) y PT (0.65) y positivamente con Al_{ox} (0.63). La correlación negativa con el limo se contrapone a lo encontrado por Sayin *et al.* (1990). Sin embargo Fox, Kamprath (1970) sugirieron un más fácil acceso a las superficies activas de adsorción cuando estas se encuentran dispersas en un medio con partículas mayores, por lo que éstas actuarían como pantalla,

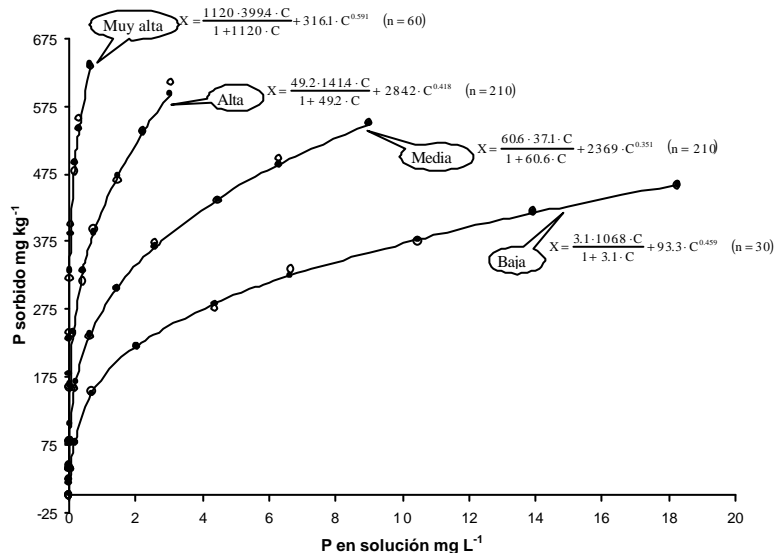


Figura 1. Clases de adsorción de P por suelos ácidos de Misiones, datos promedios de cada clase (○) y estimados (●) por la ecuación combinada de Langmuir - Freundlich.

Figure 1. P adsorption classes of acid soils of Misiones, data averages of each class (○) and estimated (●) by Langmuir - Freundlich combined equation.

impidiendo el contacto entre el sorbato y aquéllas de mayor capacidad de adsorción, tales como arcillas y sexquióxidos de Fe y Al, por lo que al aumentar el contenido de limo disminuiría la sorción.

Las correlaciones del Ca y bases intercambiables podrían ser explicadas por las interacciones del H_2PO_4^- con los cationes intercambiables que forman superficies complejas estables, especialmente dentro de la capa de Stern (Smille *et al.* 1987; Agbenin, Tiessen 1995). La adsorción de P esta influenciada por el pH y la presencia de Ca intercambiable a través de cambios en la accesibilidad de los sitios de adsorción e interacciones electrostáticas (Frossard *et al.* 1995). El incremento del PT provoca una mayor cantidad de sitios ocupados por lo que se observa una disminución significativa del coeficiente k_{ds} . En cuanto a la correlación de k_{ds} con el Al_{ox} se debe a que a mayores contenidos de Al amorfo aumentó los sitios disponibles para la adsorción de P.

CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo indican que el modelo combinado Langmuir-Freundlich es el más adecuado para describir la adsorción de fósforo de los suelos ácidos de Misiones (Argentina), logrando un mejor ajuste a bajas, medias y altas concentraciones. La adsorción de P estimada por este modelo a una concentración de 1 mg L^{-1} varió de 174 a 725 mg P kg^{-1} , permitiendo el agrupamiento de los suelos en cuatro clases de adsorción, los cuales no presentaron asociación con la taxonomía de los mismos, debido a que se trabajó con los horizontes superficiales donde no se manifiestan las características de estos órdenes.

REFERENCIAS

- Agbenin J O, Tiessen H. 1995. Phosphorus sorption at field capacity and soil ionic strength: kinetics and transformation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 998-1005.
- Borggaard O K, Jorgensen S S, Moberg J P, Raben-Lange B. 1990. Influence of organic matter on phosphate adsorption by aluminium and iron oxides in sandy soils. *J. Soil Sci.* 41: 443-449.
- Bowman R A. 1989. A sequential extraction procedure with concentrate sulfuric acid and dilute base for soil organic phosphorus. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 362-366.
- Buschiazzo D E, Hevia G F, Hepper E N. 1990. Variaciones de la adsorción de fósforo y parámetros edáficos en una climosecuencia de los suelos de la región semiárida pampeana central. *Ciencia del Suelo* 8: 119-126.
- Fox R L, Kamprath E J. 1970. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirements of soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34: 902-907.
- Freese D, van der Zee SEATM, Riemsdijk W H. 1992. Comparison of different models for phosphate sorption as a function of the iron and aluminum oxides of soils. *J. Soil Sci.* 43: 729-738.
- Frossard F M, Brossard M J, Hedley M J, Metherell A. 1995. Reactions controlling the cycling of P in soils. 107-137. In: Tiessen H. (ed.) *Phosphorus in the global environment: Transfers, cycles and management.* John Wiley & Sons, New York.
- Giuffrè de López Camelo L; Heredia O; Nervi A, Massani de Sese Z. 1984. Adsorción de P en algunos suelos argentinos. Condiciones experimentales e isothermas de adsorción. *Rev. Fac. Agronomía* 5: 165-174.
- Kuo S. 1996. Phosphorus 908-909. In: D L Sparks et al. (ed). *Methods of Soils Analysis. Part 3. 5th, SSSA, Madison, Wisc.*
- Lin C, Busscher W J, Douglas L A. 1983. Multifactor kinetics of phosphate reactions with minerals in acidic soils. I. Modeling and simulation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 1097-1103.
- Loeppert R L, Inskeep W P. 1996. Iron 639-664. In: D L Sparks et al. (ed). *Methods of Soils Analysis. Part 3. 5th, SSSA, Madison, Wisc.*
- Mendoza R E, 1986. Isothermas de adsorción de fósforo en suelos Argentinos: I. Métodos de ajuste y comparación entre ecuaciones. *Ciencia del Suelo* 4: 107-116.
- Polyzopoulos N A, Karamidas V A, Kiosse H. 1985. Phosphate sorption by some Alfisols of Greece as described by commonly used isotherms. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 81-84.
- Quinteros C E, Boschetti N G, Benavidez R A. 1996. Estimación de la capacidad máxima de adsorción de fosfatos en suelos de Entre Ríos (Argentina). *Ciencia del Suelo* 14: 79-82.
- Ratkowsky D S. 1986. A statistical study of seven curves for describing the sorption phosphate by soils. *J. Soil Sci.* 37: 183-189.
- Sanyal S K, De Datta S K, Chan P Y. 1993. Phosphate sorption-desorption behavior of some acidic soils of south and southeast Asia. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 937-945.
- Sanyin M, Mermut A R, Tiessen H. 1990. Phosphate sorption-desorption characteristics by magnetically separated soil fractions. *Soil Sci.*

- Soc. Am. J. 54: 1298-1304.
- SAS Institute. 1985. SAS user's guide: Statistics. 5th ed. SAS Inst., Cary, NC.
- Shen S, Tu S I, Kemper W D. 1997. Equilibrium and kinetic study of ammonium adsorption and fixation in sodium – treated vermiculite. Soil Sci. Soc. Am. J. 61: 1611-1618.
- Smille G W, Curtin D, Syers J K. 1987. Influence of exchangeable calcium on phosphate retention by weakly acid soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 51: 1169-1172.
- Sposito G. 1982. On the use of the Langmuir equation in the interpretation of “adsorption” phenomena. II. The “two surface” Langmuir equation. Soil Sci. Soc. Am. J. 46: 1147-1152.
- Sposito G. 1984. The surface chemistry of soils. p 113 – 153. Oxford University Press. New York.
- Vazquez S, Dalurzo H, Lifschitz A P de, Morales L A. 1998. Fósforo total, orgánico e inorgánico en Ultisoles, Alfisoles y Oxisoles del sur de Misiones (Argentina). Ciencia del Suelo 16: 47-49.
- Yuan G, Savkulich L M. 1994. Phosphate sorption in relation to extractable iron and aluminium in Spodosols. Soil Sci. Soc. Am. J. 58: 343-346.
- Yuan T L, Lucas D E. 1982. Retention of phosphorus by sand soils as evaluated by adsorption isotherms. Proc. Soil Crop Sc. Soc. Fla. 41: 195-201.
- Zhou M, Rhue R D, Harris W G. 1997. Phosphorus sorption characteristics of Bh and Bt horizons from sandy coastal plain soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 61: 1364-1369.