

UTILIDAD DE DISTINTAS FORMAS DE EVALUACION DE LA ISOTERMAS DE SORCION DE FOSFORO Y DE FACTORES LIGADOS A LA RETENCION DEL MISMO EN ALGUNOS SUELOS TROPICALES

María J. Mazzarino *, Donald Kass y Mario Jiménez
Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, Costa Rica

RESUMEN

Se construyeron isotermas de sorción de P en 8 suelos de Costa Rica pertenecientes a los órdenes Andisol, Inceptisol, Ultisol, Vertisol y Molisol. La evaluación de los datos obtenidos basándose en una relación lineal única entre P sorbido y P en solución (método de Alvarado, ecuación de Langmuir) condujo a obtener valores muy diferentes según fuesen los valores máximos de P agregado para la construcción de la isoterma (150 y 400 mg.L⁻¹). A bajas concentraciones de P en solución (menos de 1,4 – 3,6 mg L⁻¹) las curvas presentan carácter exponencial, por lo que se recomienda desde el punto de vista de la fertilidad del suelo (y determinación de dosis de fertilizantes) trabajar con curvas a mano alzada interpolando a una concentración estandar o a la correspondiente al requerimiento externo de P del cultivo considerado (método de Fox y Kamprath). Una comparación de los valores de P sorbido a la concentración estandar de 0,2 mg L⁻¹ de P en solución según los tres métodos de evaluación analizados, arrojó variaciones muy altas de los valores calculados aplicando las ecuaciones de Langmuir y Alvarado respecto a la lectura directa propuesta por Fox y Kamprath. Tales variaciones fueron mas marcadas en el caso de los suelos con baja capacidad reguladora de P y, en general, mas bajas cuanto menor fue el valor máximo de P agregado.

La determinación del Al intercambiable y del pH en NaF 1 N permiten predecir las fuentes de retención de P y la magnitud de la misma, facilitando la construcción de las isotermas y permitiendo prever el efecto de enmiendas tales como el encalado.

Palabras clave: isotermas de sorción de P, capacidad reguladora de P, requerimiento externo de P.

UTILITY OF DIFFERENT FORMS OF P-SORPTION ISOTHERM'S EVALUATION AND FACTORS RELATED TO THE P-RETENTION IN SOME TROPICAL SOILS

ABSTRACT

P-sorption isotherms were constructed for 8 soils of Costa Rica corresponding to the orders Andisol, Inceptisol, Ultisol, Vertisol and Mollisol. Evaluation of the data based on a single linear relationship of P-sorbed vs. P-solution (Alvarado's method, Langmuir equation) led to different results depending of the maximal amounts of P-added (150 and 400 mg L⁻¹). At low concentrations of P-solution (less than 1,4 – 3,6 mg L⁻¹), the curves show an exponential character, indicating the desirability from a soil fertility standpoint of drawing a curve by eye and interpolating the value for P-sorbed at some standard concentration or at the external phosphorus requirement of the crop considered (method of Fox and Kamprath). A comparison of the P-sorbed values at a standard concentration of 0,2 mg L⁻¹ P-solution, by the three evaluation methods studies showed high variations of the calculated values from the equation of Alvarado and Langmuir compared to the direct reading proposed by Fox and Kamprath. Such variations were greater for soils with low P buffering capacity, and generally lower when less was the maximal value of P added.

Exchangeable Al and pH in NaF 1 N determinations allow the predictions of P-retention sources and their magnitude, facilitating the construction of isotherms and the prediction of liming effects.

Key words: Phosphorus sorption isotherms, phosphorus buffering capacity, external phosphorus requirement.

* Convenio Universidad de Florida/CATIE.

INTRODUCCION

La fijación de P en suelos ácidos se atribuye fundamentalmente a: 1) reacciones de precipitación en suelos con alto contenido de Al-intercambiable (Hsu y Rennie, 1962) y 2) reacciones de sorción en suelos ricos en "óxidos libres" de Fe y Al o en alófanos. Estas partículas se comportan como anfóteras, pero son capaces de adsorber fosfatos de manera específica incluso por encima del punto isoelectrico, o sea, en un amplio rango de pH (Sánchez y Uehara, 1980).

A pesar de la enorme cantidad de trabajos sobre este tema, no es posible, sin embargo, asegurar cuales son los mecanismos que determinan la fijación de P ni sus interacciones.

Con las isotermas de sorción se describe la relación existente entre la cantidad de P en solución y la sorbida a las partículas del suelo a una temperatura dada. Los datos obtenidos pueden incluirse en ecuaciones (Langmuir, Freundlich, Tempkin) que permiten calcular valores máximos de sorción de P. El problema principal consiste en que al no poder asegurarse cuales son los mecanismos de retención de este elemento, resulta difícil ajustar el proceso a una ecuación. Así por ejemplo, aplicando la ecuación de Langmuir:

$$C/x/m = \frac{1}{K_1 K_2} + \frac{C}{K_2} \quad (\text{Ec. 1})$$

donde C = concentración de P en solución; x = P sorbido y m = cantidad de suelo, es posible calcular la sorción máxima de P (K_2) y la constante de afinidad (K_1). Sin embargo, se ha encontrado en numerosos trabajos que una sola ecuación de Langmuir no ajusta los datos de manera satisfactoria; esto ha llevado a postular que existen dos e incluso tres tipos de sitios capaces de sorber P con diferente afinidad y, por lo tanto, con distintas capacidades de sorción máxima (Hsu y Rennie, 1962; Udo y Uzu, 1972; Karim et al., 1973; Syers et al., 1973; Rhodes, 1977).

Las ecuaciones de Tempkin y Freundlich tienen en cuenta la disminución de la afinidad a medida que aumenta la sorción, lo que permite un mejor ajuste de los datos (Giuffrè de López Camelo et al., 1984). Sin embargo, también en estos casos se obtienen curvas suaves en lugar de las líneas rectas que requerirían estas ecuaciones (Barrow, 1978). Recientemente Alvarado (1982) sostuvo que, trabajando con grandes cantidades de P (hasta 560 mg L⁻¹) la relación P extraído y P agregado se ajusta a un modelo lineal, de ma-

nera que a partir de la pendiente es posible calcular un valor máximo de sorción.

En lugar de ajustar los datos a determinadas ecuaciones Fox y Kamprath (1970) propusieron representar P sorbido en función del log. del P en solución e interpolar el valor de P sorbido a una concentración de 0,2 mg L⁻¹, considerando que esta concentración es la adecuada para el buen crecimiento de la mayoría de las plantas.

El presente trabajo se propone: 1) analizar la utilidad de distintas formas de evaluación de la isoterma de sorción (ecuación de Langmuir, Alvarado, Fox y Kamprath) en una serie de suelos tropicales pertenecientes a los órdenes Andisol, Inceptisol, Ultisol, Vertisol y Molisol. 2) Evaluar el uso de métodos rápidos de determinación de dos factores ligados a la fijación de P en suelos ácidos: Al-intercambiable con KCl 1N y "Al-activo" o "amorfo" con NaF 1N, a fin de facilitar e incluso aun evitar la construcción de las isotermas.

MATERIALES Y METODOS

Se trabajó con 8 suelos de Costa Rica con diferentes grados de influencia volcánica: el Hydrandep es el que presenta mayor influencia, mientras que el Pelustert y el Haplustol no presentan ninguna. Las características generales de estos suelos se presentan en la Tabla 1. Los suelos fueron analizados según los métodos descritos por Hunter (1974) utilizando el extracto de Olsen modificado (0,5 M NaHCO₃ + 0,01 M EDTA) para P y K disponible. La acidez intercambiable, Ca y Mg se extrajeron con KCl 1N en una relación suelo-solución de 1: 10. El pH fue determinado en una solución suelo-agua de 1: 2,5. El P se determinó por el método sulfomolibdico; K, Ca y Mg por espectrofotometría de absorción atómica; acidez y Al intercambiables por titulación con OHNa 0,1N y HCl 0,1N. El pH en NAF 1N se midió en una relación suelo-solución de 1: 50 y un tiempo de reacción de 2 minutos.

Las isotermas de sorción se determinaron de acuerdo al método de Fox y Kamprath (1970): se equilibraron 3 g de muestra pasada por tamiz de 2 mm (por triplicado) durante 6 días en 30 ml de CaCl₂ 0,01M, conteniendo 0, 35, 50, 75, 100, 150, 200, 300 y 400 mg L⁻¹ de Ca (H₂ PO₄)₂. En el caso de los suelos con baja capacidad de retención de P (Vertisol y Molisol) se usaron 0, 5, 10, 20, 50, 75, 150 y 300 mg L⁻¹. 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. Durante los 6 días de

duración del experimento se almacenaron en cámara climática a 25°C. El P se determinó colorimétricamente por el método sulfomolibdico utilizando ácido ascórbico como reductor. (Murphy y Riley, 1962; Olsen et al., 1982).

El porcentaje de retención máxima de P según Langmuir se calculó de la siguiente manera:

$$\% P \text{ retenido} = (K_2/\text{valor máximo de P agregado}) \cdot 100$$

donde K_2 es el valor máximo de P retenido en valores absolutos (Ec. 1) y según Alvarado:

$$\% P \text{ retenido} = (1 - b) \cdot 100$$

donde b es la pendiente de la recta que representa el P extraído vs. P agregado.

RESULTADOS Y DISCUSION

En la Tabla 2 se presentan los valores de retención máxima de P calculados según la ecuación de Langmuir y el método propuesto por Alvarado (1982) agregando hasta 400 mg L⁻¹ P. Como puede observarse en la Fig. 1 -representación según Alvarado- las grandes cantidades de P agregado minimizan el carácter exponencial de la curva a bajas concentraciones. Algo semejante ocurre con la aplicación de la ecuación de Langmuir: si bien los coeficiente de determinación (R²) son muy altos, la Fig. 2 permite reconocer que a bajas concentraciones de P en solución (menos de 1,4 mg L⁻¹ para el Pelustert, Haplustol, Tropohumult y Dystropept óxico; menos de 3,3 - 3,6 mg L⁻¹ para el Tropohumult ándico y Dystrandept típico) existe una isoterma diferente a la que corres-

TABLA 1: Características de los suelos estudiados.

Suelos N°	8	7	6	5	4	3	2	1
Clasificación taxonómica	Hydrandept	Dystrandeps típicos	Tropohumult ándico	Tropohumult	Dystropept óxico	Pelustert típico	Haplustol	
Prof. (cm)	0-20	5-25	5-25	0-20	0-20	0-20	0-20	0-20
pH	5.1	5.4	4.9	4.7	4.9	4.7	6.4	6.5
P (mg kg ⁻¹)	3.0	4.0	2.5	2.5	5.7	5.1	9.1	13.5
K	0.05	0.25	0.11	0.07	0.35	0.69	0.16	0.20
Ca	0.3	6.64	0.92	0.4	2.34	6.4	13.2	12.67
Mg	0.03	2.20	0.34	0.19	0.98	2.4	5.4	3.47
Acidez extr.	0.20	0.50	2.20	3.3	1.40	0.6	0.4	0.2
Al extr.	0.12	--	1.50	2.5	0.80	--	--	--
pH en NaF 1N	10.9	9.6	10.5	9.8	9.4	9.0	8.8	8.9

TABLA 2: Valores de retención máxima de P (%), coeficientes de determinación (R²) y constantes de energía de retención (K₁) calculados por el método de Alvarado y la ecuación de Langmuir agregando soluciones de P de 0-400 mg L⁻¹.

Clasificación taxonómica	Suelos N°	Alvarado		Ecuación de Langmuir		K ₁
		P ret.	R ²	P ret.	R ²	
Molisol	1	40,6	0,975	42,1	0,961	0,07
Vertisol	2	53,5	0,967	52,8	0,941	0,06
Incept.	3	81,8	0,822	80,7	0,991	0,37
Ultisoles	4	94,1	0,740	95,5	0,994	1,03
	5	97,7	0,767	100,0	0,991	1,89
Andisoles	6	88,7	0,759	89,0	0,995	0,59
	7	98,1	0,689	100,0	0,998	1,97
	8	99,7	0,765	100,0	0,988	3,16

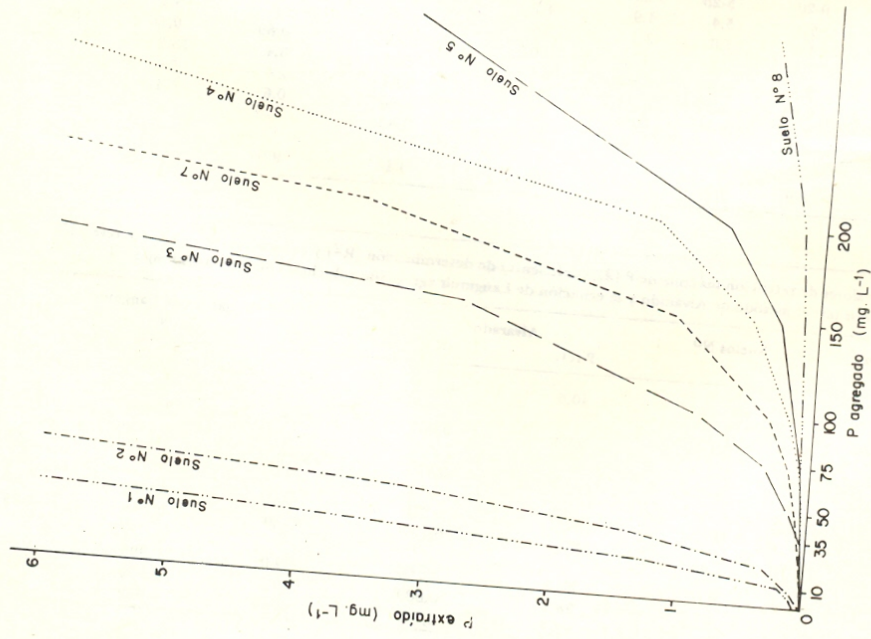


Fig. 1: Isothermas de sorción de P construídas representando P extraído en función de P agregado (método de Alvarado).

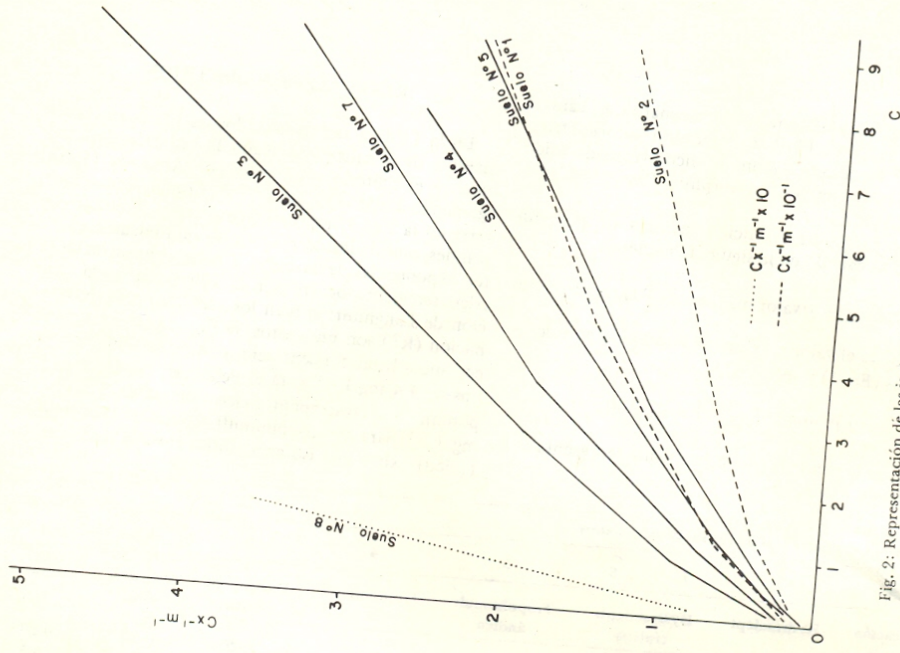


Fig. 2: Representación de las isotermas de sorción de P aplicando las coordenadas de la ecuación de Langmuir, $C = \text{mg P. L}^{-1}$ de solución, $x/m = \text{mg P. g}^{-1}$ de suelo.

ponde a concentraciones mayores. Estos valores coinciden con datos de la bibliografía (Karim et al., 1973; Rhodes, 1977; Kawai, 1980). Los valores tan altos de determinación que se obtienen aplicando la ecuación de Langmuir se deben simplemente al hecho de que la concentración es un componente de las dos variables representadas, de esta manera se reduce la variabilidad de los datos y se aumenta la correlación entre los mismos (Harter, 1984). Por otro lado, las diferencias entre los porcentajes de retención calculados con los dos métodos son muy bajos (aproximadamente 1 por ciento en todos los casos) por lo que resultaría más ventajoso utilizar la ecuación de Alvarado que la de Langmuir, ya que esta última implica un número adicional de cálculos.

En la Tabla 3 se presentan los valores obtenidos cuando se agregan hasta 150 mg L^{-1} de P, como puede observarse, los valores de retención máximos calculados por ambos métodos son mayores que los obtenidos trabajando con $0-400 \text{ mg L}^{-1}$ P; esto es lógico pues en ambos casos la sorción es mayor cuando menor es la pendiente de la recta y esta es siempre menor entre $0-150$ que entre $0-400 \text{ mg L}^{-1}$ P. La magnitud de esta diferencia de pendientes queda claramente de manifiesto en la Fig. 3 donde se representan dos casos -suelos N° 4 y 7- calculados según la ecuación de Alvarado. Basándose en trabajos previos Alvarado (1982) sostuvo que el modelo lineal ajusta los datos porque: 1) los altos niveles de P agregados linearizan la curva que resulta exponencial a bajas concentraciones, 2) la superficie de sorción es tan grande que los sitios no llegan a saturarse, 3) se forman nuevos sitios por rotura de óxidos amorfos de Al y de alófanos, a partir de aproximadamente 3000 ug P.g^{-1} de suelo.

Este tipo de cálculos arroja, por lo tanto, resultados muy diferentes según sea el valor máximo de P

agregado; para poder utilizarlos con fines comparativos sería necesario estandarizar dichos valores máximos o subdividir las curvas obtenidas en varias regiones, recalculando los porcentajes de sorción para cada región. El uso de valores máximos de sorción y/o constantes de afinidad resultan cómodos pues se trabaja con unos pocos números en lugar de toda una curva; estos números pueden ser usados con fines comparativos o, a su vez ser relacionados a alguna otra propiedad asociada con la retención de P (Barrow, 1978). Sin embargo, las cantidades de P en solución agrónomicamente relevantes corresponden a la parte exponencial de la curva, de manera que, desde el punto de vista de la fertilidad del suelo se ofrece una información muy limitada cuando se trabaja con valores de sorción obtenidos a partir de una única curva supuestamente lineal.

En la Fig. 4 se representa P sorbido en función del log. de P en solución según lo proponen Fox y Kamprath (1970), interpolando el valor de P sorbido a una concentración de P en solución de $0,2 \text{ mg L}^{-1}$. En lugar de utilizar un valor fijo lo ideal sería calcular los "requerimientos externos de P", o sea, la concentración requerida por el cultivo considerado para alcanzar un 95 por ciento del rendimiento máximo, ya que para un gran número de cultivos tropicales este valor es menor de $0,2 \text{ mg L}^{-1}$ (Sánchez y Uehara, 1980, Fox, 1981). Este tipo de curvas puede usarse para predecir la cantidad de fertilizante necesaria para mantener valores adecuados de P en la solución del suelo. Ya que se considera que valores de P en la solución de equilibrio mayores a 1 mg L^{-1} no son agrónomicamente relevantes es posible además trabajar con cantidades menores de P que las requeridas para calcular valores máximos de sorción. Por otro lado, el uso de una concentración estándar permite compa-

TABLA 3: Valores de retención máxima de P (%), coeficientes de determinación (R^2) y constantes de energía de retención (K_1) calculados por el método de Alvarado y la ecuación de Langmuir agregando soluciones de P de $0-150 \text{ mg L}^{-1}$.

Clasificación taxonómica	Suelos N°	P ret.	R^2	P ret.	R^2	K_1
Molisol	1	55,6	0,948	58,4	0,960	0,16
Vertisol	2	73,7	0,893	76,1	0,977	0,27
Incept.	3	98,2	0,815	100,0	0,984	2,61
Ultisoles	4	99,7	0,820	100,0	0,984	7,29
	5	99,8	0,748	100,0	0,943	7,98
Andisol	6	99,3	0,784	100,0	0,997	3,09

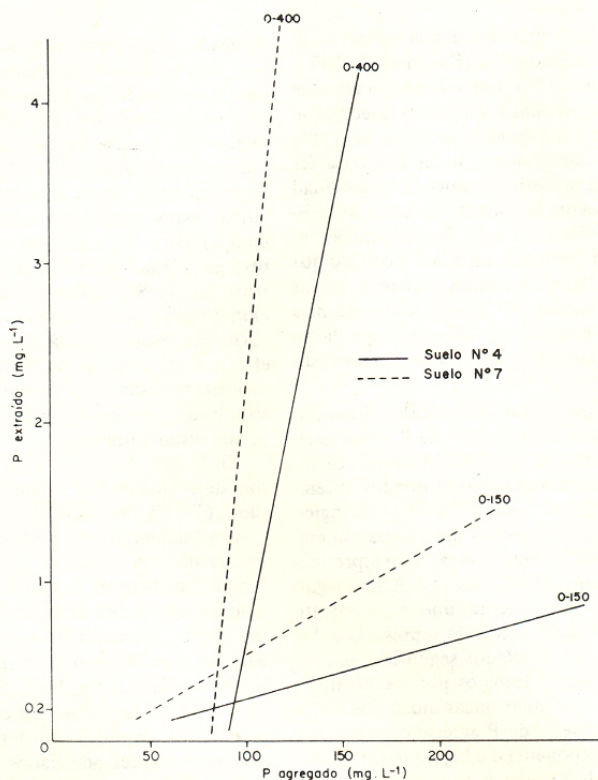


Fig. 3: Diferencia entre pendientes obtenidas aplicando la ecuación de la recta a la relación P extraído vs. P agregado para distintas concentraciones máximas de P agregado.

rar suelos entre ellos. Según Sánchez y Uehara (1980) las cantidades fijadas a la concentración estandar de $0,2 \text{ mg L}^{-1}$ varían de $0-2800 \text{ ug P.g}^{-1}$ suelo; si bien estas curvas representan un continuum estos autores consideran que los suelos que requieren mas de 150 ug P.g^{-1} para prover $0,2 \text{ mg L}^{-1}$ en solución son altamente fijadores.

Si se calculan los valores de P sorbido para la concentración estandar de $0,2 \text{ mg L}^{-1}$ a partir de las "rectas" de Langmuir o Alvarado y se los compara con el obtenido aplicando el método de Fox y Kamprath se observan grandes variaciones: Tablas 4 y 5. Con la ecuación de Langmuir se subestima prácticamente en todos los casos el valor de P sorbido; esto resulta mas marcado en suelos poco a altamente fijadores (hasta 1000 ug P.g^{-1} suelo: Haplustol, Pelustert, Dystropept óxico, Tropohumult y Dystrandept con alta saturación de Al; Hydrandept) y cuando se

agregan bajas concentraciones de P ($0-150 \text{ mg P. L}^{-1}$). Cuando se aplica la ecuación propuesta por Alvarado la situación es aun mas variable: se sobreestima mucho en el caso de suelos poco fijadores y se subestima (variaciones entre 24-37 por ciento) para suelos muy altamente fijadores. Al igual que en el caso anterior, estas variaciones son menos marcadas cuando se agregan $0-150 \text{ mg L}^{-1}$ de P. En el Cuadro 5 no se incluyen las muestras N° 6 y 8 pues por tratarse de suelos muy altamente fijadores se cuenta con pocos valores confiables de P en solución entre $0-150 \text{ mg L}^{-1}$ de P agregado.

La construcción de isotermas de sorción de P es un proceso lento y sujeto a la existencia de laboratorios adecuados. Además, suelos con alta capacidad de retención de P requieren agregar cantidades iniciales mayores de $\text{Ca (H}_2\text{PO}_4)_2$ que suelos con baja capacidad y/o aumentar el volumen de las alicuotas, a fin

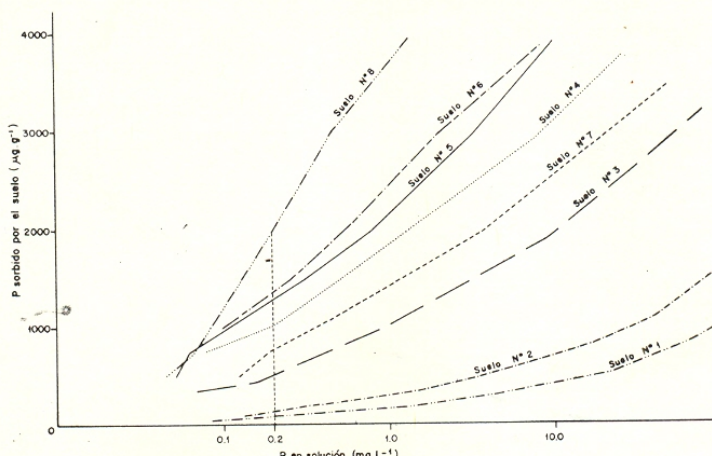


Fig. 4: Isotermas de sorción construidas según el método de Fox y Kamprath (1970).

TABLA 4: Valores de retención de P ($\mu\text{g g}^{-1}$ suelo) para una concentración en solución de $0,2 \text{ mg L}^{-1}$ calculados por los tres métodos considerados para 0-400 mg L^{-1} de P agregado y desviación respecto al método de Fox y Kamprath.

Clasificación taxonómica	Suelos N°	Fox y K.	Alvarado	% Desv. Ec. Langmuir	% Desv.	
Molisol	1	85	193	+ 127	17	- 86
Vertisol	2	125	344	+ 175	24	- 81
Incept.	3	510	696	+ 37	221	- 57
Ultisoles	4	1.000	925	- 8	651	- 35
	5	1.275	872	- 32	1.100	- 14
Andisoles	6	765	817	+ 7	378	- 51
	7	1.350	1.026	- 24	1.164	- 14
	8	2.000	1.253	- 37	1.900	- 5

de permitir la determinación dentro de los límites de detección de los espectrofotómetros comunes. A fin de facilitar esta tarea e incluso evitar la construcción de las isotermas cuando lo que se pretende es una idea general de la retención de P, es posible utilizar métodos rápidos de determinación de dos factores ligados a la misma: KCl 1N para acidez y/o Al intercambiable y NaF 1N para Al amorfo. Sin bien también sería interesante la determinación de óxidos libres de Fe, gran parte de la bibliografía consultada destaca la mayor importancia de los óxidos de Al en la retención del P (Udo y Uzu, 1972; Kawai, 1980; Sánchez, 1981); por otro lado, las determinaciones de óxidos de Fe no pueden caracterizarse como "métodos rápidos".

El método del NaF 1N fue desarrollado originalmente por Fieldes y Perrott (1966) para determinar

presencia de alófanos cuando el pH es mayor de 9,4. Sin embargo, trabajos posteriores han demostrado que esta prueba no es específica para alófanos, sino que permite detectar óxidos amorfos de Al en general (Brydon y Day, 1970; Mizota, 1982; Kimble et al., 1984). En el presente trabajo se ha considerado que valores de pH en NaF mayores de 9,4 indican presencia de cenizas volcánicas y/u óxidos amorfos de Al y que valores mayores de 10,7 indican una retención de P mayor del 90 por ciento (Alvarado, 1982). En la Tabla 6 es posible observar una tendencia a mayor retención de P para suelos con pH en NaF entre 9,4-10,7 y mayor porcentaje de saturación de Al: suelos N° 4 y 5 (Ultisoles) y 6 y 7 (Andisoles). El Hydrandep (N° 8) representa dentro de los Andisoles a los suelos con mayor capacidad de retención (Fox, 1981) con un pH en NaF mayor de 10,7. Por otro lado, sue-

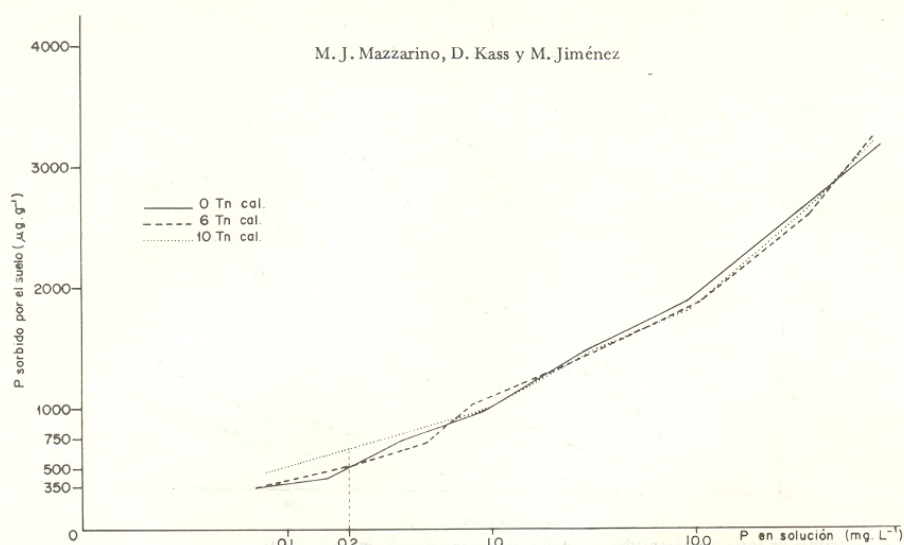


Fig. 5: Isotermas de sorción del suelo N° 3 para niveles de 0, 6 y 10 tn de cal por hectárea (representación según Fox y Kamprath).

TABLA 5: Valores de retención de P ($\mu\text{g g}^{-1}$ suelo) para una concentración en solución de $0,2 \text{ mg L}^{-1}$ calculados por los tres métodos considerados para 0-150 mg L^{-1} de P agregado y desviación respecto al método de Fox y Kamprath.

Clasificación taxonómica	Suelos N°	Fox y K.	Alvarado	% Dev. Ec. Langmuir	% Devs.
Molisol	1	85	139	+ 63	27 - 68
Vertisol	2	125	212	+ 70	58 - 54
Incept.	3	510	399	- 22	561 + 10
Ultisoles	4	1.000	825	- 18	1.104 + 10
	5	1.275	1.239	- 4	1.291 + 1
Andisol	7	765	502	- 34	731 - 4

los menos ácidos con mineralogía de silicatos laminares (N° 1 y 2, Molisol y Vertisol respectivamente) presentan la menor capacidad de fijación de P (Sánchez, 1981).

La identificación de las causas de retención permite predecir, además, la utilidad de determinadas enmiendas, como el encalado en la disminución de la misma. Si la retención de P se debe a la presencia de óxidos amorfos de Al o derivados de cenizas volcánicas, el encalado no podrá mejorar su disponibilidad. Según Sánchez y Uehara (1980) el encalado de suelos con alta saturación ácida (60-83 por ciento) y pH 4,4-5,2 disminuye la fijación de P, mientras que no se observan resultados positivos en los casos de pH más altos (5-6) y baja saturación ácida (0-45 por ciento) se presenta el efecto del encalado del suelo N° 3, un suelo ácido de pH 4,7 y 6 por ciento de acidez intercambiable con niveles de hasta 10 tn de cal por hectárea;

este suelo corresponde a la zona Atlántica de Costa Rica donde es común recomendar esta práctica para varios cultivos. La aplicación de cal en este tipo de suelos puede incluso inducir la formación de fosfatos de Ca relativamente insolubles, como es aparentemente el caso del ejemplo presentado.

No se ofrece en el presente trabajo ningún suelo donde la retención solo sea atribuible al Al intercambiable; además, se ha trabajado con un número limitado de muestras, de manera que solo puede hablarse de tendencias generales. Una excepción a esta tendencia general la constituye el Dystropept óxico (N° 3) ya que ambos valores (Al intercambiable y Al amorfo) son muy bajos no permitiendo prever una fijación tan alta: $510 \mu\text{g P g}^{-1}$ de suelo; probablemente la fijación se deba en este caso a óxidos de Al en cantidades o formas no detectables con el NaF o a óxidos de Fe.

TABLA 6: P retenido a la concentración estandar de 0,2 mg L⁻¹, pH en NaF 1N y % de saturación de Al y/o acidez intercambiable de los 8 suelos considerados.

Clasificación taxonómica	Suelos N°	P retenido (ug g ⁻¹) para 0,2 mg L ⁻¹	pH en NaF	% Al int.	% Acidez interc.
Molisol	1	85	8,9	--	1
Vertisol	2	125	8,8	--	2
Incept.	3	510	9,0	--	6
Ultisoles	4	1.000	9,4	16	28
	5	1.275	9,8	63	83
Andisoles	6	1.350	10,5	42	62
	7	765	9,6	--	7
	8	2.000	10,9	21	35

CONCLUSIONES

Para los 8 suelos considerados las isotermas de sorción de P presentan a bajas concentraciones (menos de 1,4-3,6 mg L⁻¹ de P en solución) carácter exponencial; la utilización de grandes cantidades de P que producen incluso ruptura del material original y exposición de nuevos sitios de retención enmascara dicho carácter. El uso de una única curva supuestamente lineal (Alvarado, ecuación de Langmuir) para calcular un valor promedio o máximo de retención de P conduce, por lo tanto, a valores muy diferentes según sea el valor máximo de P agregado. En todos los casos considerados se obtuvieron valores mayores de retención a menor concentración del valor máximo agregado (150 mg L⁻¹ respecto a 400 mg L⁻¹ de P). Lo mismo sucedió con la constante de energía de unión calculada según la ecuación de Langmuir.

Dado que las cantidades de P en solución agrónomicamente relevantes corresponden a la parte exponencial de la curva, resulta más interesante desde el punto de vista de la fertilidad del suelo el método de evaluación de isotermas propuesto por Fox y Kamprath (1970) donde se representa directamente P sorbido en función del log. de P en solución; interpolando a una concentración estandar en solución o a la correspondiente al requerimiento externo de P del

cultivo considerado es posible comparar suelos entre ellos y realizar recomendaciones de fertilizantes.

Cuando se calculó el valor de P retenido para 0,2 mg L⁻¹ en solución según las rectas de Alvarado y Langmuir y se lo comparó con el valor leído directamente de la curva según Fox y Kamprath se observaron subestimaciones muy altas (35-86 por ciento) con Langmuir para los suelos que fijan menos de 1.000 ug P.g⁻¹ y de 24-37 por ciento con Alvarado para suelos que fijan más de 1.000 ug.g⁻¹. Con ambas ecuaciones las desviaciones alcanzaron el máximo (por sobreestimación o subestimación) para los suelos con baja capacidad reguladora de P y fueron más bajas a menor concentración del valor máximo de P agregado.

Una forma rápida de prever la capacidad de fijación en suelos no calcáreos consiste en determinar Al amorfo (a través del pH en NaF 1N) y Al de intercambio. Esto permite a su vez identificar las fuentes de fijación de P y prever el efecto de determinadas enmiendas, como por ejemplo el encalado. De los 8 suelos considerados los valores de pH en NaF mayores de 9,4 están asociados a valores altos de fijación de P (más de 765 ug P.g⁻¹ de suelo); estos valores son aun mayores para suelos con pH en NaF mayor de 10,7 (2.000 ug.g⁻¹) o para combinaciones de pH en NaF mayor de 9,4 y porcentaje de saturación de Al mayor del 40 por ciento (1.275-1350 ug.g⁻¹).

REFERENCIAS

- Alvarado, A., 1982. Phosphate retention in Andepts from Guatemala and Costa Rica as related to other soil properties. Ph. D. Thesis. North Carolina State University, Raleigh, 82 p.
- Barrow, N. J., 1978. The description of PO₄-adsorption curves. J. Soil Sci. 29: 447-462.

- Brydon, J. E. and J. H. Day, 1970. Use of the Fieldes and Perrot NaF test to distinguish the B horizons of Podzols in the field. *Can. J. Soil Sci.* 50: 35-41.
- Fox, R. L., 1981. External P requirements of crops. In: *Chemistry in the soil environment*. ASA-SSSA, Madison, Wisconsin, p. 223-39.
- Fox, R. L. and E. J. Kamprath, 1970. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirements of soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34: 902-7.
- Fieldes, M. and K. N. Perrot, 1966. The nature of allophane in soils. III. Rapid field and laboratory test for allophane. *New Zeal. J. Sci.* 9: 623-29.
- Giuffrè de López Camelo, L.; O. Heredia, A. Nervi y Z. Massani de Sese, 1984. Adsorción de P en algunos suelos argentinos. Condiciones experimentales e isotermas de adsorción. *Rev. Fac. Agronomía* 5: 165-174.
- Harter, R. D., 1984. Curve-fit errors in Langmuir adsorption maxima. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 749-752.
- Hsu, P. H. and D. A. Rennie, 1962. Reactions of phosphate in aluminum systems. II. Precipitation of phosphate by exchangeable Al on a cation resin. *Can. J. Soil Sci.* 42: 210-221.
- Hunter, A. H., 1974. International soil fertility evaluation and improvement laboratory procedures. Dep. of Soil Sc., North Carol. State Univ. Raleigh.
- Karim, M., F. Ahmed and A. Islam, 1973. A study of P-adsorption by four Bangladesh soils. *Geoderma*, 9: 221-227.
- Kawai, K., 1980. The relationship of P-adsorption to amorphous Al for characterizing Andosols. *Soil Sci.* 129: 186-189.
- Kimble, J. M.; C. S. Holzhey and G. G. S. Holmgren, 1984. An evaluation of KOH-extractable Al in Andepts. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 1366-69.
- Mazzarino, M. J.; M. Jimenez; D. Kass y J. U. Urena, 1984. Efecto del encalado de suelos ácidos con baja saturación de Al utilizados para la producción de frijol en dos sitios de Costa Rica. Presentado en la 30a. Reunión Anual del PCCMCA, Managua. (Actas en prensa).
- Mizota, C., 1982. Clay mineralogy of a Dystrandept and a Haplaquad from Northland, N. Zealand. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 28: 293-301.
- Murphy, J. and J. P. Riley, 1962. A modified single solution method for determination of phosphates in natural waters. *Anal. Chem. Acta* 27: 31-36.
- Olsen, S.R. and L. E. Sommers, 1982. Phosphorus-Chapter 24. In: *Methods of Soil Analysis-Part 2*. 2nd. ed. Agronomy No 9. ASA, SSSA, Madison, Wisc.
- Rhodes, E. R., 1977. Simple phosphate sorption index on some soils of the humid tropics. *Plant and Soil* 46: 263-266.
- Sánchez, P. A., 1981. Suelos del Trópico: Características y Manejo IICA, Costa Rica, 660 p.
- Sánchez, P. A. and G. Uehara, 1980. Management considerations for acid soils with high P-fixation capacity. In: *The Role of Phosphorus in Agriculture*. ASA, CSSA, SSSA. Madison, Wisc., p. 471-514.
- Syers, J. K.; M. G. Browman; G. W. Smillie and R. B. Corey, 1973. Phosphate sorption by soils evaluated by the Langmuir adsorption equation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 37: 358-363.
- Udo, E. J. and F. O. Uzu, 1972. Characteristics of P-adsorption by some Nigerian soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 36: 879-882.