

PROCESOS DE RETENCION DE FOSFORO POR LOS SUELOS EVALUADOS A TRAVES DE PARAMETROS DE SUELO Y PLANTA

J. Hernández y J. P. Zamalvide

Recibido: 6 de julio de 1998. Aceptado: 31 de agosto de 1998.

RESUMEN

Con el objetivo de caracterizar en el corto plazo los procesos de retención de fósforo en suelos del Uruguay, se seleccionaron 21 muestras de 0-15 cm de diferentes tipos de suelos bajo campo natural sin fertilización previa, desarrollados a partir de diferentes materiales de origen. Se realizó el ajuste de isothermas de retención de fósforo, calculándose a partir de ellas diferentes índices de retención. Se encontraron diferencias importantes entre suelos en cuanto a los índices de retención de fósforo, las cuales estuvieron asociadas a variaciones en el contenido de óxidos de hierro, arcilla y aluminio intercambiable. Suelos desarrollados a partir de materiales del Basamento Cristalino, Basalto y Sedimentos Pelíticos Grises mostraron los valores más altos de retención de fósforo, en tanto que suelos de texturas livianas formados a partir de areniscas triásicas y cretácicas, presentaron baja retención de fósforo. En los mismos suelos se realizó un estudio macetero en invernáculo, con niveles variables de fósforo agregado (0, 26.2, 52.4 y 78.6 mg P maceta⁻¹), evaluándose el fósforo absorbido por plantas de raigrás a través de dos cortes. Fueron observadas menores tasas de absorción de fósforo en suelos de alto poder de retención, lo que estaría indicando una baja eficiencia de utilización del fósforo agregado en dichos suelos. Hubo altas correlaciones entre los índices de retención evaluados a través del suelo con la eficiencia de utilización por la planta del fósforo agregado.

PALABRAS CLAVE: retención de fósforo, isothermas de retención de fósforo, eficiencia de uso del fósforo, óxidos de hierro, arcilla, aluminio intercambiable.

SUMMARY

PHOSPHOROUS SORPTION PROCESS EVALUATED BY SOIL AND PLANT PARAMETERS

The P sorption processes in soils were evaluated in 21 uruguayan soil samples (0-15 cm) developed from different parent materials. P adsorption isotherms were adjusted and different P sorption indexes were calculated. Wide variation in P sorption was found among soils, associated to their iron oxides, clay and exchangeable aluminum content. Soils developed from igneous and basaltic rocks and some clayed sediments (Sedimentos Pelíticos Grises) showed the highest P sorption degree, whereas soils developed from sandy triassic and cretacic sediments showed low P sorption. High correlations between the different sorption indexes were found. A glasshouse experiment was developed on the soils with different levels of P added (0, 26.2, 52.4 and 78.6 mg P pot⁻¹), and P uptake in two cuts of ryegrass plants was evaluated. Low rates of P uptake by plants and low recovery of P added were found in soils with high P retention capacity. These results suggest lower efficiency of fertilizer additions for these soils. The different P sorption indexes were highly correlated with the different rates of P uptake by plants.

KEY WORDS: P sorption, P adsorption isotherms, P recovery, iron oxides, clay, exchangeable aluminum.

INTRODUCCION

El fósforo es uno de los nutrientes principales para las plantas, siendo necesario su adecuado suministro por parte de los suelos para condiciones no limitantes del crecimiento vegetal. Los suelos del Uruguay presentan niveles de suministro de fósforo naturalmente insuficientes para el normal desarro-

llo de la mayoría de los cultivos y pasturas sembradas, por lo cual es necesario su agregado a través de los fertilizantes fosfatados. A nivel productivo se presenta como la primer limitante desde el punto de vista nutricional para la instalación y persistencia de pasturas con leguminosas

El fósforo agregado a los suelos a través de los fertilizantes reacciona rápidamente con diferentes constituyentes del suelo, formando compuestos de muy baja solubilidad con cationes como hierro, aluminio y calcio (Sample et al., 1980). Estos procesos determinan una pérdida de la

asimilabilidad para las plantas del fósforo agregado en función del tiempo. La intensidad de dichos procesos presenta variaciones entre suelos, lo cual determina diferencias en su capacidad de retención y en la eficiencia de utilización por la planta del fósforo agregado. De aquí la importancia de caracterizar la intensidad de dichos procesos en diferentes suelos y de identificar características de los suelos asociadas con ellos.

Los enfoques clásicos para estudiar los procesos de retrogradación del fósforo agregado a los suelos han sido, por un lado, a través de su caracterización en el corto plazo, identificando los constituyentes de suelo responsables del mismo (Olsen y Khasawneh, 1980; Sánchez y Uehara, 1980). Otra línea de trabajos se basó en el estudio de las reacciones de los fertilizantes fosfatados agregados a los suelos y la asimilabilidad relativa de los compuestos formados, así como su residualidad en función del tiempo (Barrow, 1973; Barrow y Carter, 1978; Barrow, 1980; Holford, 1982; Pothuluri et al, 1991).

Probablemente uno de los enfoques más desarrollado ha sido el de caracterizar dichos procesos en el corto plazo mediante la metodología de las isothermas de retención de fósforo (Fox y Kamprath, 1970; Syers et al., 1973; Barrow, 1978; Roy and De Data, 1985; Kuo, 1988). La metodología básica consiste en equilibrar muestras de un mismo suelo con soluciones de diferente concentración conocida de fósforo, determinando luego de cierto tiempo cuánto del fósforo agregado permaneció en solución y cuánto pasó a formas retenidas en la fase sólida del suelo. Luego se establecen relaciones entre los valores de fósforo en la solución y los correspondientes a fósforo retenido en la fase sólida, realizando el ajuste de diferentes modelos matemáticos y la estimación de parámetros de retención de fósforo (Índices de Retención), los cuales permiten caracterizar los suelos desde el punto de vista de su capacidad de retener al fósforo (Ozanne y Shaw, 1967, 1968; Bache y Williams, 1971; Holford, 1979). Algunos de estos índices son utilizados en algunos países conjuntamente con el dato de análisis del fósforo asimilable obtenido por los métodos clásicos, a los efectos de las recomendaciones de fertilización de cultivos y pasturas (Cornforth y Sinclair, 1982; Holford y Cullis, 1985; Kuo, 1990).

En nuestro país se han desarrollado algunas investigaciones tendientes a caracterizar la capacidad de retención de fósforo por la metodología de isothermas. Escudero y Morón (1978), trabajando con 39 muestras de horizonte A de diferentes suelos del país ajustaron la metodología de laboratorio, logrando identificar diferencias importantes en su capacidad de retención de fósforo. Se calcularon diferentes índices de retención de fósforo, estudiándose la correlación entre sí, y la relación entre estos con algunas características de suelo relevantes en la retrogradación de fósforo. Se encontraron altas correlaciones de los índices con el contenido de óxidos de hierro, arcilla y aluminio intercambiable de los suelos. Los autores finalmente agrupan los suelos de las diferentes unidades de mapeo en categorías de acuerdo al grado de retención de fósforo.

Un estudio más restringido de la retención de fósforo para algunos suelos del Dpto. de Cerro Largo fue realizado por Cayota et al. (1981). Estos autores realizaron la caracterización física y química de diferentes perfiles de suelo representativos de algunas unidades de mapeo del citado Departamento. En dicha caracterización se incluyó el estudio mediante isothermas de retención de fósforo en muestras de horizonte A de los suelos, encontrando diferencias importantes en retención de fósforo, las cuales estuvieron asociadas al contenido y tipo de mineral arcilloso predominante, contenido de óxidos de hierro y aluminio intercambiable.

El presente trabajo tiene como objetivo caracterizar los procesos de retención de fósforo en diferentes suelos del país, de importancia en la producción de pasturas y mejoramientos extensivos, a través de la metodología de isothermas de retención de fósforo y experimentos maceteros en invernáculo. Los resultados obtenidos permitirán la caracterización primaria de los suelos desde el punto de vista de su poder de retención de fósforo, en función de características asociadas al proceso, y su efecto en la eficiencia de uso del fósforo agregado para las plantas. Por otra parte, la evaluación de algunos índices de retención de fósforo posibilitará su uso futuro como parámetro de caracterización de suelos y como información complementaria a los tests de análisis de suelo para fósforo asimilable, a los efectos de realizar recomendaciones de fertilización fosfatada, especialmente en sistemas bajo pasturas.

MATERIALES Y METODOS

Se seleccionaron 21 muestras de horizonte A de diferentes suelos del país, de importancia en la producción de pasturas y mejoramientos extensivos. Las muestras provenían de suelos desarrollados a partir de diferentes materiales de origen, y en todos los casos correspondían a situaciones de campo natural sin fertilizar o con historia de fertilización no reciente. La caracterización química de estos suelos, así como de las diferentes formas de fósforo, fue realizado en un trabajo anterior (Hernández et al., 1995). Algunas características de estos suelos se presentan en el Cuadro 1.

Experimento de retención

Se colocaron 2.5 g de suelo en tubos de centrífuga de 50 mL con 25 mL de una solución de CaCl_2 0.01M con concentraciones variables de fósforo como $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$. Las concentraciones de las soluciones fueron 0, 1, 2.5, 5, 10, 15, 25, 40, 60 y 100 mg P L⁻¹, las cuales equivalen a agregados de 0, 10, 25, 50, 100, 150, 250, 400, 600 y 1000 mg P kg⁻¹ de suelo, respectivamente. Se agregaron además 2 gotas de tolueno para inhibir la actividad microbiana. Los suelos se equilibraron con las soluciones durante 18 horas a 25°C en un agitador recíproco (100 golpes por minuto), luego del cual las muestras fueron centrifugadas a 5000 rpm y filtradas para obtener un extracto límpido. Se determinó el contenido de fósforo en la solución, mediante el agregado de molibdato de amonio y re-

Cuadro 1. Características físicas y químicas de los 21 suelos evaluados (muestras de 0-15 cm de profundidad).

Tipo de suelo / Unidad M.A.P.- D.S.F.	Material de origen (*)	ArcillaFe _d (**)H ₂ O	pH	pH KC1	C.I.C.	Al orgánico	C orgánico	P Bray Nº 1	P Total	P orgánico
		g kg ⁻¹ mg kg ⁻¹	---	---	cmol _c kg ⁻¹	g kg ⁻¹	---	---	---	---
VERTISOL ITAPABI-TRES ARBOLES I	Sed. LAC s/F.Arapey	517 19513	6.0	4.8	51.9	-	42.3	4.0	536	271
VERTISOL ITAPABI-TRES ARBOLES II	Sed. LAC s/F.Arapey	494 9092	5.6	4.9	54.9	-	49.5	3.9	442	216
VERTISOL FRAILE MUERTO	Sed. Pelíticos Grises	566 8183	5.6	4.2	34.9	-	30.4	2.7	280	140
VERTISOL TALA-RODRIGUEZ	F.Libertad	450 3357	6.0	5.0	44.5	-	34.7	6.2	401	195
BRUNOSOL LOS MIMBRES	Sed. LAC s/F.Yaguari	342 4966	5.4	4.4	31.3	-	31.4	6.0	342	185
BRUNOSOL SAN MANUEL	Sed. LAC s/F.Fray Bentos	307 4126	6.1	5.3	32.3	-	29.2	5.4	283	139
BRUNOSOL BEQUELO	Sed. LAC s/F.Fray Bentos	375 2098	6.0	5.2	39.3	-	39.2	4.6	497	253
BRUNOSOL TOLEDO	F.Libertad	260 6225	6.7	5.1	17.0	-	19.1	3.2	456	228
BRUNOSOL COLONIA PALMA	Sed.AcAr	218 2308	5.7	4.6	16.6	-	14.9	3.2	171	94
BRUNOSOL CAÑADA NIETO	Sed. ArAc F.Fray Bentos	229 5176	6.1	5.1	23.0	-	24.6	4.3	322	161
BRUNOSOL CUCHILLA CORRALITO	Sed. ArAc cuaternarios	184 2588	5.4	4.5	17.9	-	19.1	8.3	264	136
LUVISOL CERRO CHATO	Basamento Cristalino	244 8323	5.1	4.2	16.4	0.32	23.5	2.9	274	121
ARGISOL SIERRA DE POLANCO	Basamento Cristalino	260 9302	5.3	4.2	19.6	0.41	25.6	6.4	304	142
PLANOSOL RIO BRANCO	F.Dolores	210 2448	5.7	4.2	7.9	-	11.5	2.4	187	89
SOLOD LA CHARQUEADA	F.Dolores	150 1399	5.3	4.3	13.0	-	18.5	3.9	163	73
ARGISOL ALGORTA	Areniscas Cretácicas	123 1469	5.3	4.5	9.9	-	11.9	13.0	191	79
ACRISOL RIVERA	F. Tacuarembó	101 3847	5.5	4.6	5.5	0.07	7.9	4.1	152	71
LUVISOL TACUAREMBO	F. Tacuarembó	86 1329	5.2	4.2	7.0	0.19	10.4	7.2	140	68
LUVISOL MANUEL ORIBE	Sed. ArAc Tres Islas	152 3427	5.0	4.2	10.7	0.22	16.2	2.5	239	116
LITOSOL CURTINA	F.Arapey	379 29025	5.5	4.7	43.2	-	62.5	3.9	887	429
GLEYSOL SAN RAMON	F.Dolores	625 3917	6.1	4.9	52.1	-	45.9	5.1	435	223

Nota: Textura del Material de origen: LAC: limo arcilloso; ArAc: areno arcilloso.

ducción selectiva con SnCl_2 , midiendo la intensidad del color azul desarrollado en un espectrofotómetro a una longitud de onda de 660 nm (Jackson, 1964). El fósforo retenido por la fase sólida en cada punto fue calculado como diferencia entre el fósforo presente en solución y el fósforo agregado. Al no disponer de datos del contenido inicial de fósforo retenido en la fase sólida, los valores correspondientes al fósforo retenido se refieren a cuánto del fósforo agregado a los suelos quedó retenido en la fase sólida y mantiene una determinada concentración en la solución.

Con los puntos experimentales obtenidos se ajustaron los siguientes modelos matemáticos:

Modelo de Langmuir:

$$x/m = \frac{K \cdot B \cdot c}{1 + K \cdot c}$$

donde: x/m = P adsorbido por unidad de peso de suelo (mg kg^{-1})

c = concentración de P en la solución en equilibrio (mg L^{-1})

K = constante relacionada con la energía de adsorción

B = máximo de adsorción

Modelo de Freundlich:

$$y = a \cdot c^{1/n}$$

donde: y = P adsorbido por unidad de peso de suelo (mg kg^{-1})

c = concentración de P en la solución en equilibrio (mg L^{-1})

a, n = constantes

Modelo logarítmico:

$$y = a + b \cdot Lc$$

donde: y = P adsorbido por unidad de peso de suelo (mg kg^{-1})

c = concentración de P en la solución en equilibrio (mg L^{-1})

a, b = constantes

Este último modelo se ajustó para los cuatro puntos de concentración más baja de fósforo agregado (1, 2.5, 5 y 10 mg P L^{-1}).

En base al ajuste de los citados modelos se calcularon diferentes índices de retención de fósforo.

- Parámetro B de la Ecuación de Langmuir.

- Parámetro K de la Ecuación de Langmuir.

- $P_{0.2F}$: fósforo retenido por la fase sólida para mantener 0.2 mg P L^{-1} en la solución

calculado a partir del modelo de Freundlich.

- $P_{0.2(4P)}$: fósforo retenido por la fase sólida para mantener 0.2 mg P L^{-1} en la solución calculado a partir del modelo ajustado con 4 puntos.

- $P.B._{0.2}$: tangente a la isoterma de Langmuir a 0.2 mg P L^{-1} en la solución.

- P_{600} : porcentaje del fósforo que fue retenido con el agregado de 600 mg P kg^{-1} de suelo.

- P_{1000} : porcentaje del fósforo que fue retenido con el agregado de 1000 mg P kg^{-1} de suelo.

Experimento macetero en invernáculo

Con los 21 suelos se realizó un experimento macetero en condiciones controladas de invernáculo. Cada suelo fue molido y tamizado a un tamaño de partículas <1 cm, colocando 1.8 kg de suelo seco por maceta de plástico. Los tratamientos para cada suelo consistieron en cuatro niveles de agregado de fósforo: 0, 26.2, 52.4 y 78.6 mg P en cada maceta, simulando dosis equivalentes en la hectárea (a una profundidad de 15 cm) de 0, 60, 120 y 180 $\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$. El fósforo fue agregado bajo forma de $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ en polvo mezclado con el suelo. En todos los suelos, luego del agregado de fósforo, las macetas fueron llevadas a Capacidad de Campo, sembrándose 40 semillas de raigrás por maceta, siendo luego colocadas en el invernáculo. Se agregó una solución nutritiva con macro y micronutrientes (sin fósforo) al comienzo del experimento. Luego de la emergencia de las plantas se realizó un raleo de plantas, dejando 25 plantas por maceta. Se realizaron dos cortes de las plantas de raigrás. Luego del primer corte se agregó nuevamente una solución nutritiva con macro y micronutrientes (sin fósforo). Las plantas cortadas fueron secadas a estufa a 65°C , molidas y tamizadas. Posteriormente se realizó la mineralización por vía húmeda de las muestras ($\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$), determinando luego su contenido de fósforo por colorimetría mediante el método por reducción con ácido ascórbico (Murphy y Riley, 1962).

Análisis estadístico

Se analizaron los datos de los estudios de laboratorio (isotermas de retención) con los provenientes del experimento en invernáculo. Fueron utilizados los procedimientos PROC CORR y PROC GLM del SAS (SAS Institute, 1985).

RESULTADOS Y DISCUSION

Evaluación del proceso de retención a través de parámetros de suelo

En la Figura 1 se indican las relaciones entre el fósforo presente en solución y el fósforo retenido en fase sólida para los 21 suelos.

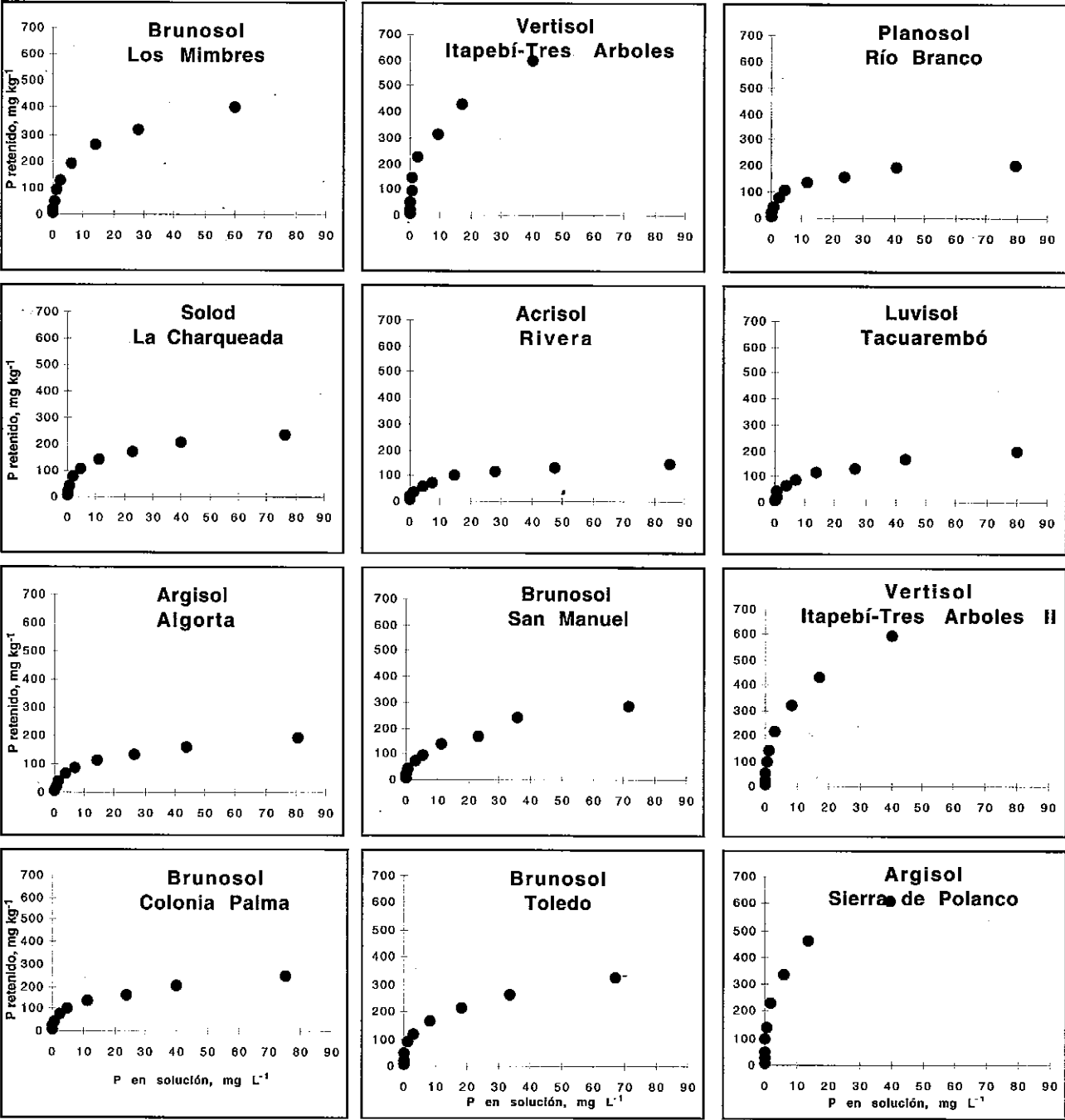


Figura 1. Relaciones fósforo en solución-fósforo retenido en fase sólida para los 21 suelos estudiados

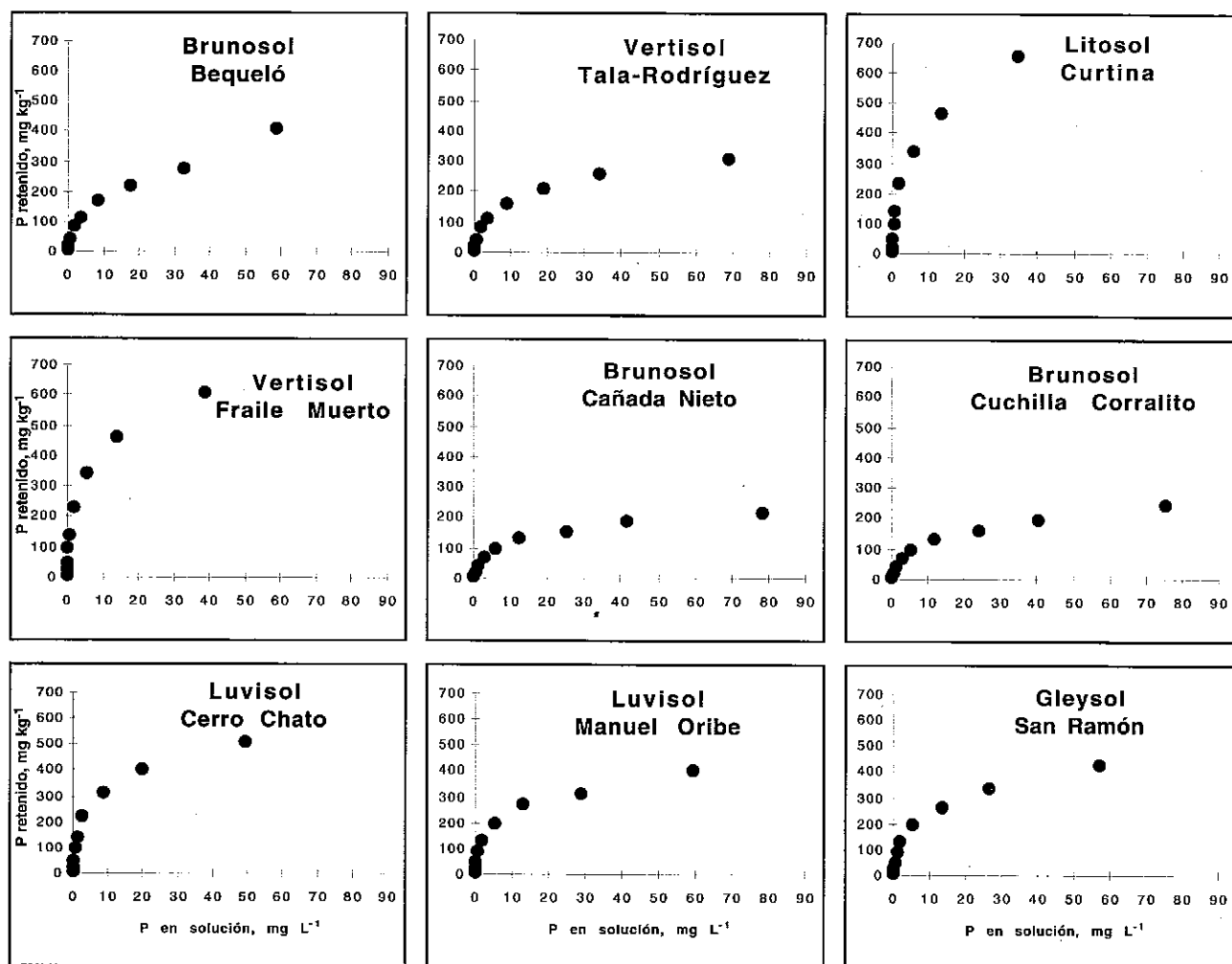


Figura 1. Relaciones fósforo en solución-fósforo retenido en fase sólida para los 21 suelos estudiados

Cuadro 2. Ajuste de los modelos de Langmuir, Freundlich y logarítmico a los datos experimentales de adsorción de fósforo para los 21 suelos estudiados.

Tipo de suelo / Unidad M.A.P.- D.S.F.	MODELO		
	Langmuir	Freundlich	Logarítmico
VERTISOL ITAPABI-TRES ARBOLES I	0.956	0.928	0.960
VERTISOL ITAPABI-TRES ARBOLES II	0.967	0.955	0.988
VERTISOL FRAILE MUERTO	0.986	0.931	0.969
VERTISOL TALA-RODRIGUEZ	0.986	0.959	0.982
BRUNOSOL LOS MIMBRES	0.984	0.961	0.973
BRUNOSOL SAN MANUEL	0.959	0.981	0.982
BRUNOSOL BEQUELO	0.922	0.973	0.982
BRUNOSOL TOLEDO	0.977	0.974	0.974
BRUNOSOL COLONIA PALMA	0.968	0.981	0.970
BRUNOSOL CAÑADA NIETO	0.986	0.967	0.972
BRUNOSOL CUCHILLA CORRALITO	0.972	0.971	0.971
LUVISOL CERRO CHATO	0.988	0.917	0.982
ARGISOL SIERRA DE POLANCO	0.985	0.896	0.957
PLANOSOL RIO BRANCO	0.993	0.978	0.920
SOLOD LA CHARQUEADA	0.988	0.970	0.973
ARGISOL ALGORTA	0.979	0.977	0.976
ACRISOL RIVERA	0.990	0.986	0.961
LUVISOL TACUAREMBO	0.976	0.977	0.980
LUVISOL MANUEL ORIBE	0.980	0.917	0.991
LITOSOL CURTINA	0.976	0.930	0.989
GLEYSOL SAN RAMON	0.981	0.939	0.992

Tal como surge de la comparación de las gráficas individuales para cada suelo, se encontraron diferencias importantes entre suelos en términos de retención de fósforo. Los suelos desarrollados sobre materiales del Basamento Cristalino (Unidades Cerro Chato y Sierra de Polanco), basaltos de la Formación Arapey (Unidad Curtina) o sedimentos cuaternarios con influencia de la alteración de este material (Unidad Itapebí-Tres Arboles), y finalmente, suelos desarrollados sobre Sedimentos Pelíticos Grises (Unidad Fraile Muerto) mostraron alto poder de retención de fósforo. Dicho comportamiento surge de los valores más elevados de fósforo retenido por la fase sólida para mantener los diferentes niveles de fósforo en la solución, comparado con los restantes suelos. Por el contrario, en suelos desarrollados a partir de materiales de tipo areniscas de la Formación Tacuarembó (Unidades Tacuarembó y Rivera), areniscas cretácicas (Unidad Algorta) fueron los de menor poder de retención de fósforo. También fue encontrada re-

tención relativamente baja en suelos desarrollados de materiales de textura media de la Formación Dolores de las planicies de la zona este del país (Unidades Río Branco y La Charqueada) y materiales cuaternarios areno-arcillosos (Unidades Cañada Nieto, Cuchilla de Corralito y Colonia Palma). Estos resultados confirman los resultados obtenidos por Escudero y Morón (1978) en un trabajo previo.

El ajuste de los diferentes modelos de isothermas de adsorción a los datos experimentales en general fue bueno, tal como surge de los valores de R^2 presentados en el Cuadro 2. No obstante los modelos de Langmuir y Freundlich presentaron ciertos sesgos en la descripción de los datos experimentales. El modelo de Langmuir subestima los valores de fósforo retenido por el suelo a concentraciones bajas en la solución, en tanto que sobreestima los mismos a concentraciones intermedias; por el contrario estima bien la retención a concentraciones altas de fósforo en solución. El modelo de Freundlich, si bien subestima en parte el fós-

foro retenido a concentraciones bajas en la solución al igual que Langmuir, esto ocurre en mucho menor grado. Su comportamiento frente a los restantes puntos experimentales fue bueno, excepto para el nivel más alto de fósforo agregado, donde sobreestima el valor de fósforo retenido, lo cual hace que los valores de R^2 resulten en general menores a los de Langmuir. El modelo ajustado en base a los puntos bajos de la isoterma también mostró valores significativos de R^2 . Este último modelo permitió describir mejor las relaciones entre fósforo en solución y fósforo adsorbido en fase sólida a concentraciones bajas en la solución, tales como las que suceden en condiciones de campo frente al agregado de un fertilizante.

En base a los resultados observados en dichos ajustes se seleccionaron una serie de índices de retención de fósforo

(descriptos en materiales y métodos), los cuales fueron calculados para cada suelo. Dichos resultados se presentan en el Cuadro 3.

De los datos presentados en el cuadro, surge claro el comportamiento mencionado anteriormente, relativo al alto poder de retención de fósforo de los suelos desarrollados a partir de materiales del Basamento Cristalino, Formación Arapey y formaciones cuaternarias con aporte de basalto, y Sedimentos Pelíticos Grises. Considerando el índice P_{1000} (porcentaje del fósforo agregado al suelo con una solución de 100 mg P L⁻¹ que fue retenido en fase sólida), en estos suelos se retuvo más del 50% del fósforo agregado. De acuerdo al valor de este índice, se puede establecer una clasificación de los suelos en diferentes categorías de retención (Cuadro 4).

Cuadro 3. Índices de retención de fósforo para los 21 suelos estudiados.

Tipo de suelo / Unidad M.A.P.- D.S.F.	Coef. B	Coef. K	$P_{0.2F}$	$P_{0.2(4P)}$	P.B. 0.2	P_{600}	P_{1000}
VERTISOL ITAPABI-TRES ARBOLES I	604	0.314	52.2	75.8	168.1	71.3	60.0
VERTISOL ITAPABI-TRES ARBOLES II	620	0.250	41.6	59.8	140.5	71.7	59.7
VERTISOL FRAILE MUERTO	631	0.402	55.0	83.9	217.1	76.7	61.2
VERTISOL TALA-RODRIGUEZ	319	0.190	22.9	26.8	56.3	43.2	30.8
BRUNOSOL LOS MIMBRES	410	0.239	36.9	35.9	89.1	53.3	40.1
BRUNOSOL SAN MANUEL	300	0.119	17.3	18.6	34.2	40.5	28.2
BRUNOSOL BEQUELO	413	0.126	22.1	26.9	49.6	45.5	41.2
BRUNOSOL TOLEDO	331	0.230	31.9	44.2	69.4	44.3	32.8
BRUNOSOL COLONIA PALMA	254	0.168	22.5	28.0	39.8	33.9	25.1
BRUNOSOL CAÑADA NIETO	223	0.164	16.9	16.0	34.3	31.2	21.5
BRUNOSOL CUCHILLA CORRALITO	254	0.136	16.5	15.4	32.7	32.9	24.6
LUVISOL CERRO CHATO	516	0.402	51.3	77.4	177.6	67.3	50.8
ARGISOL SIERRA DE POLANCO	632	0.367	53.3	87.6	201.3	77.4	60.8
PLANOSOL RIO BRANCO	209	0.286	25.5	32.8	53.5	32.2	20.4
SOLOD LA CHARQUEADA	238	0.232	24.7	31.7	50.6	34.0	23.4
ARGISOL ALGORTA	197	0.153	16.7	16.9	28.3	26.7	19.2
ACRISOL RIVERA	150	0.205	18.0	21.0	28.4	21.3	14.7
LUVISOL TACUAREMBO	202	0.152	17.2	18.4	28.9	28.4	19.6
LUVISOL MANUEL ORIBE	406	0.288	37.6	54.4	104.5	52.1	40.5
LITOSOL CURTINA	688	0.314	49.1	73.5	191.2	78.1	65.8
GLEYSOL SAN RAMON	449	0.200	27.9	35.0	83.0	56.3	43.2

NOTA: Coef. B es el coeficiente B del modelo de Langmuir; Coef. K es el coeficiente K del modelo de Langmuir; $P_{0.2F}$ es el Pretenido por la fase sólida (mg P kg⁻¹) para mantener 0.2 mg PL⁻¹ en la solución, calculado según el modelo de Freundlich; $P_{0.2(4P)}$ es el Pretenido por la fase sólida (mg P kg⁻¹) para mantener 0.2 mg P L⁻¹ en la solución, calculado según el modelo logarítmico; P.B._{0.2} es el poder buffer a la concentración de 0.2 mg P L⁻¹ de solución; P_{600} es el porcentaje de P que fue retenido por la fase sólida con el agregado de 600 mg P kg⁻¹; P_{1000} es el porcentaje de P que fue retenido por la fase sólida con el agregado de 1000 mg P kg⁻¹.

Cuadro 4. Categorías de retención de fósforo para los 21 suelos evaluados, en base al dato correspondiente al índice P_{1000} .

Valor del índice P_{1000} (*)	Unidades de Suelo
> 50	Curtina, Fraile Muerto, Sierra de Polanco, Itapebí-Tres Árboles, Cerro Chato
40 - 49	San Ramón, Bequeló, Manuel Oribe, Los Mimbres
30 - 39	Toledo, Tala-Rodríguez
20 - 29	San Manuel, Colonia Palma, Cuchilla de Corralito, La Charqueada, Cañada Nieto, Río Branco
< 20	Tacuarembó, Algorta, Rivera

(*) Porcentaje del P que fue retenido en fase sólida con el agregado de 1000 mg P kg⁻¹ de suelo.

Con respecto a los restantes índices, el comportamiento de los suelos fue similar, aunque la secuencia en términos de grado de retención no fue necesariamente la misma que para el índice P_{1000} . A modo de ejemplo, cuando se consideran las evaluaciones según el índice $P_{0.2(4p)}$, las categorías de suelos de comportamiento extremo en cuanto a retención de fósforo (altas) incluyen a los mismos suelos; en categorías intermedias y bajas las concordancias no son precisamente las mismas.

A los efectos de comparar las estimaciones realizadas por los diferentes índices, se realizó un estudio de correlación entre ellos.

Todas las correlaciones entre los diferentes índices de retención resultaron altamente significativas. Esto indicaría que cualquiera de los diferentes tipos de índices evaluados podrían ser utilizados para evaluar el proceso de retención de fósforo por los suelos. No obstante, algunos índices se presentan como más prácticos desde el punto de vista de su implementación en términos de análisis de rutina. Mientras que para algunos de ellos es necesario disponer de varios puntos experimentales para su obtención, otros están basados en un valor puntual. Tal es el caso de los índices P_{600} y P_{1000} , los cuales podrían ser utilizados con un alto valor predictivo en términos de establecer categorías de retención de fósforo para diferentes suelos.

Cuadro 5. Coeficientes de correlación y probabilidad de los mismos entre los diferentes índices de retención de fósforo.

	Coef. B	Coef. K	$P_{0.2F}$	$P_{0.2(4P)}$	$P.B_{0.2}$	P_{600}
Coef. K	0.7021 0.0004					
$P_{0.2F}$	0.9079 0.0001	0.9160 0.0001				
$P_{0.2(4P)}$	0.8962 0.0001	0.9213 0.0001	0.9864 0.0001			
$P.B_{0.2}$	0.9343 0.0001	0.8950 0.0001	0.9802 0.0001	0.9813 0.0001		
P_{600}	0.9919 0.0001	0.7579 0.0001	0.9356 0.0001	0.9218 0.0001	0.9544 0.0001	
P_{1000}	0.9993 0.0001	0.7074 0.0003	0.9136 0.0001	0.9009 0.0001	0.9349 0.0001	0.9911 0.0001

NOTA: Coef. B es el coeficiente B del modelo de Langmuir; Coef. K es el coeficiente K del modelo de Langmuir; $P_{0.2F}$ es el Pretenido por la fase sólida (mg P kg⁻¹) para mantener 0.2 mg PL⁻¹ en la solución, calculado según el modelo de Freundlich; $P_{0.2(4P)}$ es el Pretenido por la fase sólida (mg P kg⁻¹) para mantener 0.2 mg P L⁻¹ en la solución, calculado según el modelo logarítmico; $P.B_{0.2}$ es el poder buffer a la concentración de 0.2 mg P L⁻¹ de solución; P_{600} es el porcentaje de P que fue retenido por la fase sólida con el agregado de 600 mg P kg⁻¹; P_{1000} es el porcentaje de P que fue retenido por la fase sólida con el agregado de 1000 mg P kg⁻¹.

Relaciones entre retención de fósforo y diferentes características de suelo

Se evaluaron diferentes características de suelo en términos de su incidencia en el proceso de retención de fósforo. Para tal efecto, se realizó un estudio de correlación entre los diferentes valores de los índices de retención y el contenido de hierro presente en óxidos (Fe_d), el contenido de arcilla, y los niveles de aluminio intercambiable (para los suelos que lo presentaban: el Acrisol de la unidad Rive-ra, los Luvisoles de las unidades Tacuarembó, Manuel Ori-be y Cerro Chato, y el Argisol de la unidad Cerro Chato). Dichos resultados son presentados en el Cuadro 6.

Las correlaciones entre el contenido de hierro presente

en óxidos (Fe_d) de los suelos con los diferentes índices fueron altamente significativas, indicando que al aumentar el contenido de óxidos de hierro de los suelos hay una ma-yor retención de fósforo. Los valores de correlación más altos fueron con aquellos índices que caracterizan el máxi-mo de retención (índice B) o la retención frente a elevados agregados de fósforo (P_{1000}). El comportamiento obser-vado entre el contenido de óxidos de hierro y dos índices de retención se indica en la Figura 2, en la cual se observa un mejor ajuste de un modelo logarítmico si se consideran todos los datos experimentales. Si se excluyen del análisis dos suelos desarrollados a partir de materiales de basalto, de muy altos contenidos de óxidos de hierro, surge más clara una tendencia lineal entre las variables.

CUADRO 6. Coeficientes de correlación y probabilidades de los mismos entre diferentes índices de retención de fósfo-ro y el contenido de hierro en óxidos, arcilla y aluminio intercambiable.

	Arcilla	Fe_d	Aluminio	Coef. B	Coef. K	$P_{0.2F}$	$P_{0.2(4P)}$	$P.B_{0.2}$	P_{600}
Fe_d	0.4105 0.0645								
Aluminio	0.9036 0.0354	0.7957 0.1074							
Coef. B	0.6860 0.0006	0.7387 0.0001	0.9553 0.0113						
Coef. K	0.2805 0.2181	0.5237 0.0148	0.7965 0.1068	0.7021 0.0004					
$P_{0.2F}$	0.4897 0.0242	0.6827 0.0006	0.9019 0.0363	0.9079 0.0001	0.9160 0.0001				
$P_{0.2F}$	0.4453 0.0431	0.6719 0.0008	0.9144 0.0297	0.8962 0.0001	0.9213 0.0001	0.9864 0.0001			
$P.B_{0.2}$	0.5219 0.0152	0.7100 0.0003	0.9308 0.0216	0.9343 0.0001	0.8950 0.0001	0.9802 0.0001	0.9813 0.0001		
P_{600}	0.6755 0.0008	0.7110 0.0003	0.9543 0.0116	0.9919 0.0001	0.7579 0.0001	0.9356 0.0001	0.9218 0.0001	0.9544 0.0001	
P_{1000}	0.6834 0.0006	0.7342 0.0002	0.9496 0.0135	0.9993 0.0001	0.7074 0.0003	0.9136 0.0001	0.9009 0.0001	0.9349 0.0001	0.9911 0.0001

NOTA: Coef. B es el coeficiente B del modelo de Langmuir; Coef. K es el coeficiente K del modelo de Langmuir; $P_{0.2F}$ es el P retenido por la fase sólida ($mg\ P\ kg^{-1}$) para mantener $0.2\ mg\ PL^{-1}$ en la solución, calculado según el modelo de Freundlich; $P_{0.2(4P)}$ es el P retenido por la fase sólida ($mg\ P\ kg^{-1}$) para mantener $0.2\ mg\ PL^{-1}$ en la solución, calculado según el modelo logarítmico; $P.B_{0.2}$ es el poder buffer a la concentración de $0.2\ mg\ PL^{-1}$ de solución; P_{600} es el porcentaje de P que fue retenido por la fase sólida con el agregado de $600\ mg\ P\ kg^{-1}$; P_{1000} es el porcentaje de P que fue retenido por la fase sólida con el agregado de $1000\ mg\ P\ kg^{-1}$.

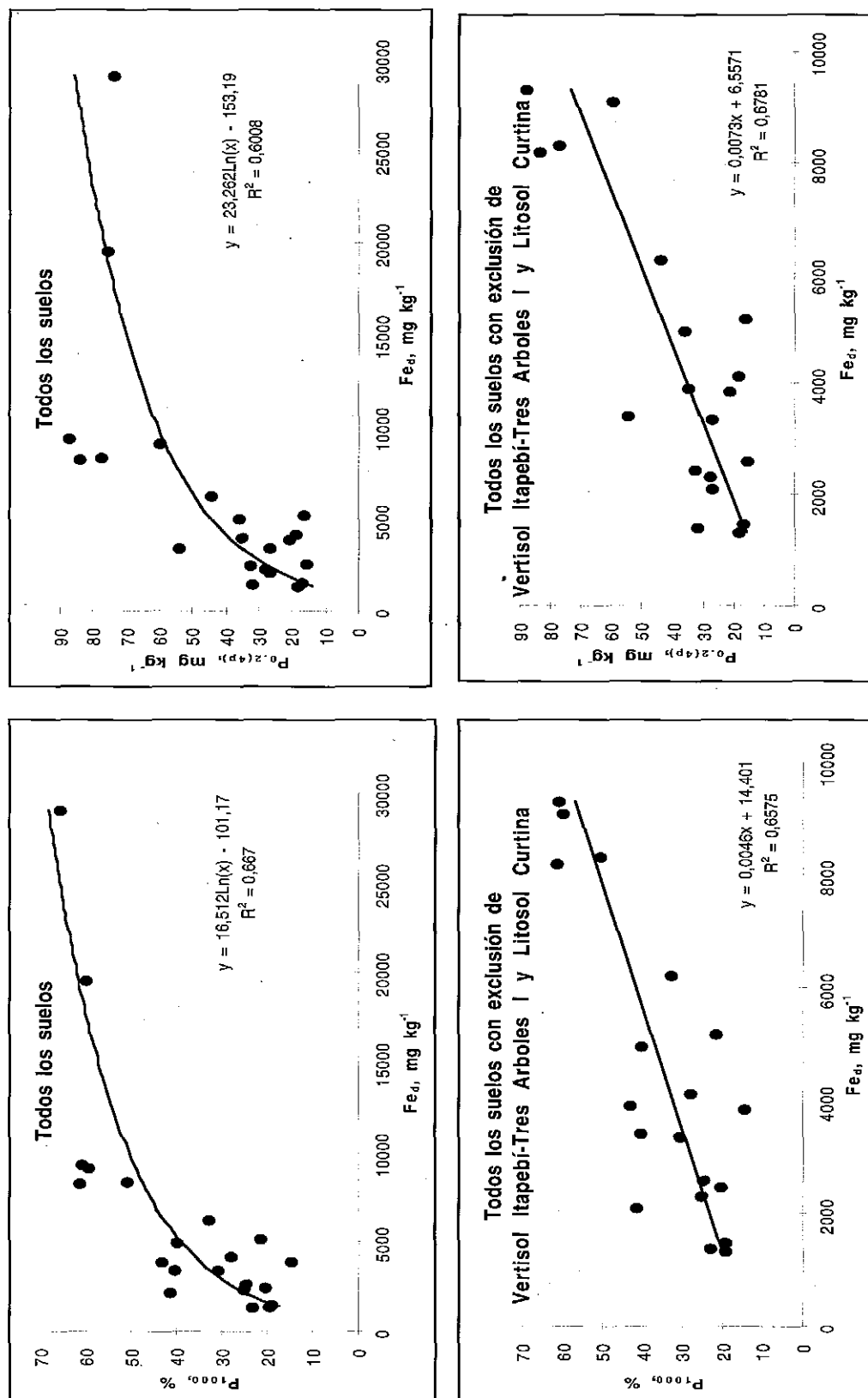


Figura 2. Relación entre el contenido de óxidos de hierro totales y diferentes índices de retención de fósforo.

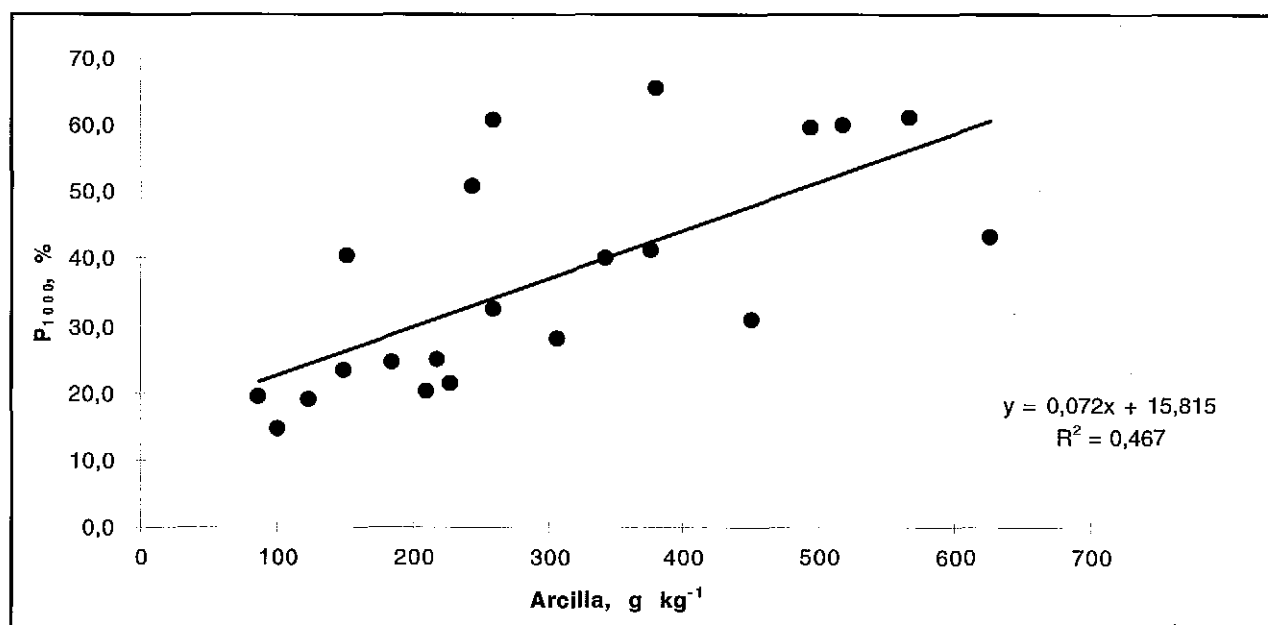


Figura 3. Relación entre el contenido de arcilla de los suelos y el índice de retención de fósforo P1000.

El contenido de arcilla de los suelos, si bien mostró correlaciones significativas con la mayoría de los índices, excepto con el índice K, presentó valores de correlación más bajos. Probablemente además del contenido total de arcilla de los suelos, el tipo de mineral arcilloso predominante muestra incidencia en el proceso de retención. En la Figura 3 se muestra la relación entre el contenido de arcilla y un índice de retención de fósforo.

En dicha gráfica, los puntos experimentales ubicados por encima de la regresión ajustada corresponden a suelos con altos contenidos de óxidos de hierro y/o aluminio intercambiable, lo cual determina un valor más elevado de retención que lo esperado de acuerdo al porcentaje de arcilla. Se realizó el ajuste de un modelo de regresión múltiple para el índice P_{1000} en función del contenido de hierro en óxidos y arcilla de los suelos, el cual dio un valor de R^2 de 0.715 ($P = 0.0001$), siendo significativos los coeficientes para ambas variables de suelo. El modelo ajustado fue el siguiente:

$$P_{1000} = 14.28 + 0.0014 (Fe_d) + 0.0484 (Ac)$$

donde Fe_d está expresado en $mg\ kg^{-1}$ y arcilla (Ac) en $g\ kg^{-1}$.

Respecto a la incidencia del contenido de aluminio intercambiable de los suelos en la retención de fósforo, solo pudo ser evaluado en cinco de los 21 suelos. De cualquier forma, las correlaciones entre este parámetro de suelo y los diferentes índices de retención de fósforo (con la excepción del ín-

dice K) dieron significativas (Cuadro 6). En la Figura 4 se indica la relación entre el contenido de aluminio intercambiable y el índice P_{1000} . Es importante destacar que los suelos desarrollados sobre materiales del Basamento Cristalino (como el de la unidad Cerro Chato), presentaron índices de retención de fósforo elevados, lo cual está asociado a la presencia de contenidos relativamente elevados de óxidos de hierro, asociados a la ocurrencia de aluminio intercambiable. Por otra parte, si bien el contenido de arcilla de dichos suelos no es muy elevado, la presencia de caolinita en forma importante en dicha fracción (Durán, com.pers.) determinaría también niveles de retención de fósforo más elevados respecto a aquellos suelos con otro tipo de minerales dominantes en su fracción arcilla.

Relación entre la eficiencia de uso del fertilizante por las plantas y los índices de retención de los suelos.

En el ensayo macetero se estudiaron las relaciones entre el fósforo agregado como fertilizante y el fósforo absorbido por las plantas. En las gráficas de la Figura 5 se muestra la relación entre el fósforo agregado y el absorbido por las plantas para el total de los dos cortes en los 21 suelos. En estas gráficas la pendiente de las rectas ajustadas puede ser utilizada como un índice de eficiencia de uso por las plantas del fertilizante agregado. En ese sentido, aquellos suelos como los de Basamento Cristalino o Basalto, en los cuales es necesario agregar más fertilizante para obtener un mismo incremento en absorción de fósforo por las plantas, indican una menor eficiencia de uso del nutriente.

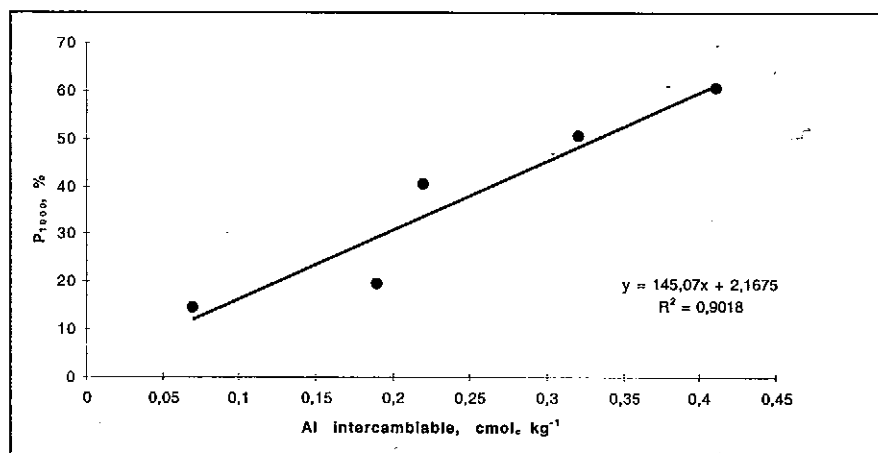


Figura 4. Relaciones entre el contenido de aluminio intercambiable de los suelos y el índice P1000.

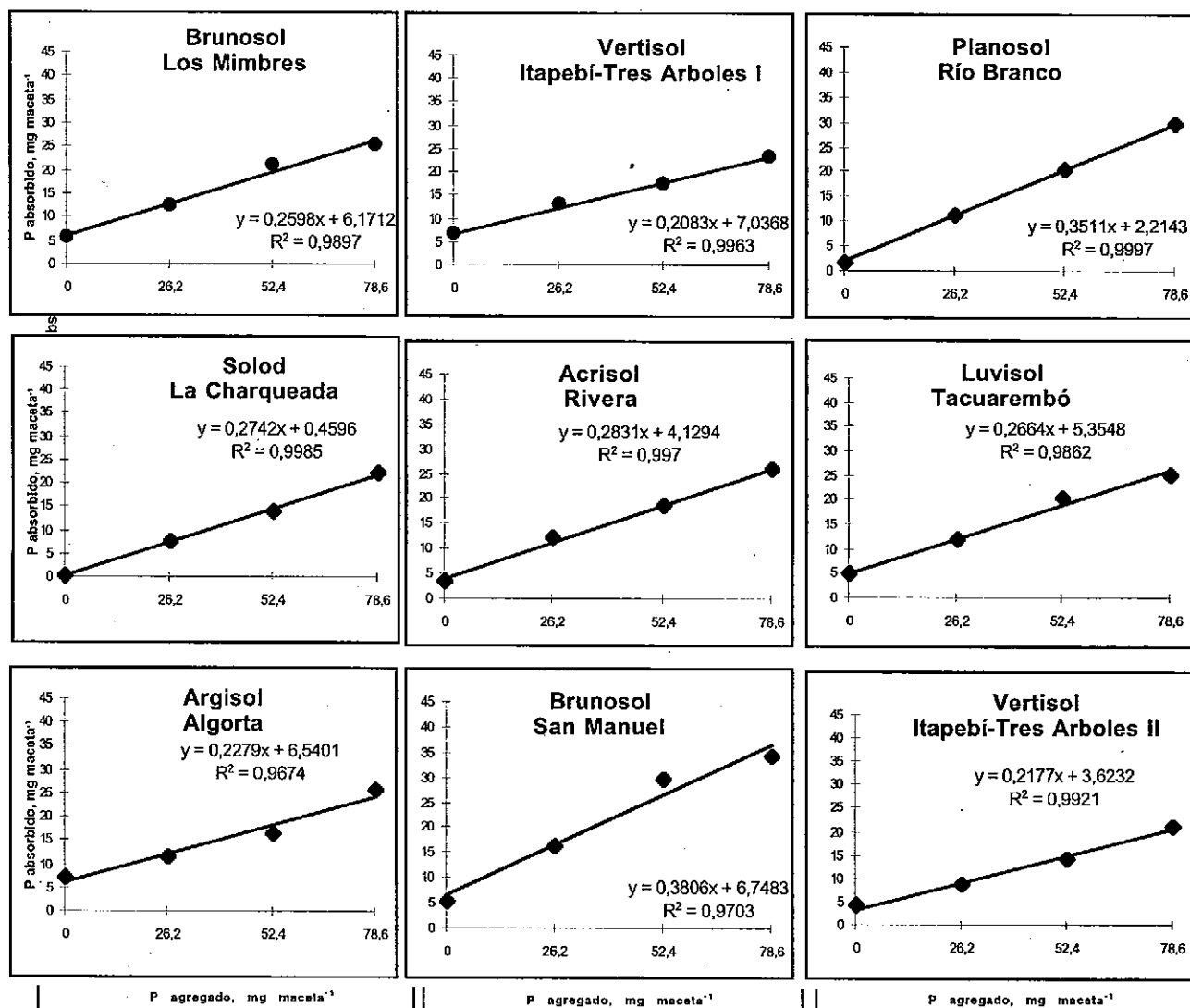


Figura 5. Relaciones entre el fósforo agregado al suelo y el fósforo absorbido por plantas de raigrás, para los 21 suelos evaluados.

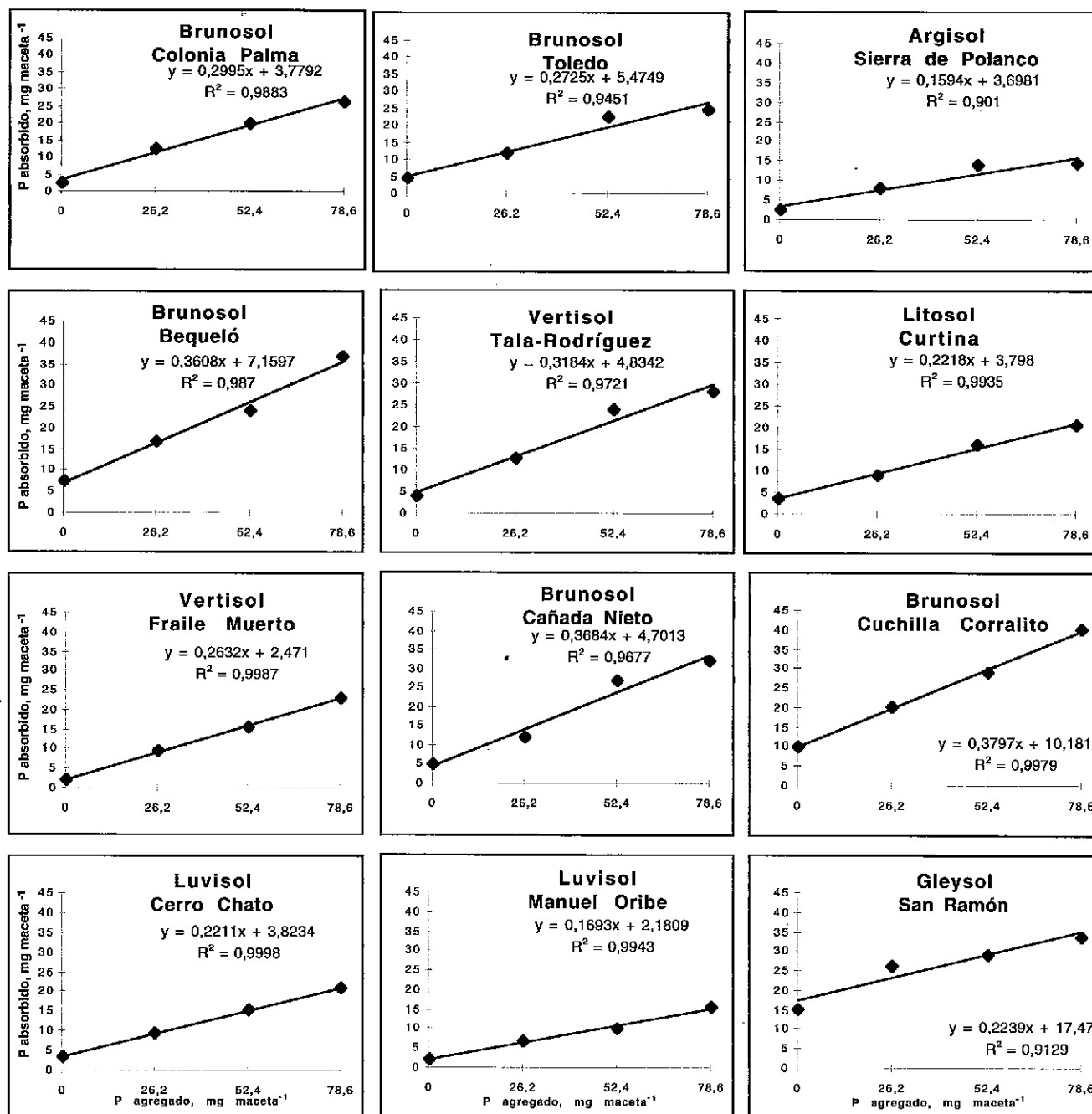


Figura 5. Relaciones entre el fósforo agregado al suelo y el fósforo absorbido por plantas de raigrás, para los 21 suelos evaluados.

Los valores de los coeficientes b de las relaciones fósforo agregado-fósforo absorbido para los cortes 1, 2 y la suma de los dos, fueron correlacionadas con los índices de retención de fósforo por los suelos, tal como se muestra en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Coeficientes de correlación y probabilidad de los mismos entre los valores de los índices de retención de fósforo de los suelos y el coeficiente b de las regresiones ajustadas a las relaciones fósforo agregado-fósforo absorbido por las plantas.

	Coeficientes b		Total
	Corte 1	Corte 2	
Coef. B	-0.5111 0.0179	-0.4947 0.0226	-0.5854 0.0053
Coef. K	-0.4063 0.0676	-0.6494 0.0014	-0.6334 0.0021
$P_{0.2F}$	-0.5295 0.0136	-0.6373 0.0019	-0.6884 0.0006
$P_{0.2(4P)}$	-0.5402 0.0115	-0.6380 0.0019	-0.6943 0.0005
$P.B_{0.2}$	-0.5210 0.0155	-0.5873 0.0051	-0.6511 0.0014
P_{600}	-0.5034 0.0200	-0.5306 0.0133	-0.6051 0.0037
P_{1000}	-0.5210 0.0155	-0.4960 0.0222	-0.5913 0.0048

NOTA: Coef. B es el coeficiente B del modelo de Langmuir; Coef. K es el coeficiente K del modelo de Langmuir; $P_{0.2F}$ es el P retenido por la fase sólida (mg P kg^{-1}) para mantener 0.2 mg PL^{-1} en la solución, calculado según el modelo de Freundlich; $P_{0.2(4P)}$ es el P retenido por la fase sólida (mg P kg^{-1}) para mantener 0.2 mg PL^{-1} en la solución, calculado según el modelo logarítmico; $P.B_{0.2}$ es el poder buffer a la concentración de 0.2 mg PL^{-1} de solución; P_{600} es el porcentaje de P que fue retenido por la fase sólida con el agregado de 600 mg P kg^{-1} ; P_{1000} es el porcentaje de P que fue retenido por la fase sólida con el agregado de $1000 \text{ mg P kg}^{-1}$.

Los valores de correlación encontrados entre ambos grupos de parámetros (suelo y planta) fueron en su mayoría significativos, lo cual indica que los índices de retención evaluados en muestras de suelo tienen un alto poder predictivo del proceso de retención del fósforo agregado en el corto plazo y la pérdida de eficiencia de uso por la planta.

Los valores siempre negativos de dichas correlaciones resultan del hecho de que a una mayor retención de fósforo por parte del suelo, la eficiencia de utilización es más baja. Las más altas correlaciones fueron obtenidas para los coeficientes b correspondientes al total de fósforo absorbido, las cuales fueron todas altamente significativas. La mayor correlación fue obtenida con el índice del fósforo retenido por la fase sólida para mantener 0.2 mg L^{-1} en la solución calculado en base a la ecuación ajustada para los puntos de concentraciones de fósforo más bajas. Tal como se mencionó, esta ecuación describiría mejor las relaciones que ocurren a concentraciones de fósforo más cercanas a las ocurridas a nivel de campo luego de una fertilización. Los índices P_{600} y P_{1000} -de mayor facilidad de medida en el laboratorio- si bien no mostraron las más altas correlaciones, igualmente resultaron significativas, lo cual permitiría su uso en caracterizar el fenómeno en el corto plazo.

Las correlaciones entre los índices de suelo y los coeficientes b de las regresiones de los cortes parciales, aunque fueron menores al total, resultaron igualmente significativas. Las correspondientes al segundo corte fueron las más elevadas. Las más bajas correlaciones en este corte fueron con los índices B, P_{600} y P_{1000} .

Se realizaron las correlaciones entre la pendiente b de las relaciones fósforo agregado- fósforo absorbido total por la planta, y el contenido de hierro presente en óxidos y el contenido de arcilla de los suelos, no encontrándose valores significativos en ambas relaciones (R^2 de 0.166 y 0.0232, respectivamente).

En la Figura 6 se indica la relación entre el valor de los coeficientes b de las regresiones entre el fósforo agregado y el fósforo total absorbido, y el valor correspondiente al índice del fósforo retenido en fase sólida para mantener 0.2 mg P L^{-1} en la solución, calculado en base a la ecuación ajustada para los puntos más bajos.

Si bien el modelo mostró un buen ajuste, se observa una mayor dispersión de los puntos a valores bajos de retención de fósforo, por debajo de 30 mg P kg^{-1} . Estos puntos corresponden a grupos individuales de suelos: los que se encuentran por debajo de la relación ajustada se corresponden con los suelos de textura liviana (unidades Tacuarembó, Rivera y Algorta), en tanto que los que están por encima se corresponden con suelos de texturas medias de las unidades sobre Fray Bentos y Cretácico. Esto podría estar indicando un significado diferente del índice utilizado en función de otras características de suelo, ya que para el mismo valor de retención de fósforo evaluado a través del índice en el suelo, surge un valor mayor de la pendiente b para los suelos de textura media, lo que estaría indicando en cierta medida una mayor eficiencia de utilización del fósforo. Los suelos de textura liviana, si bien por el porcentaje bajo de arcilla sería de esperar una baja retención de fósforo (coeficiente b elevado), presentan ciertos contenidos de aluminio intercambiable, lo que podría estar explicando en parte el comportamiento observado.

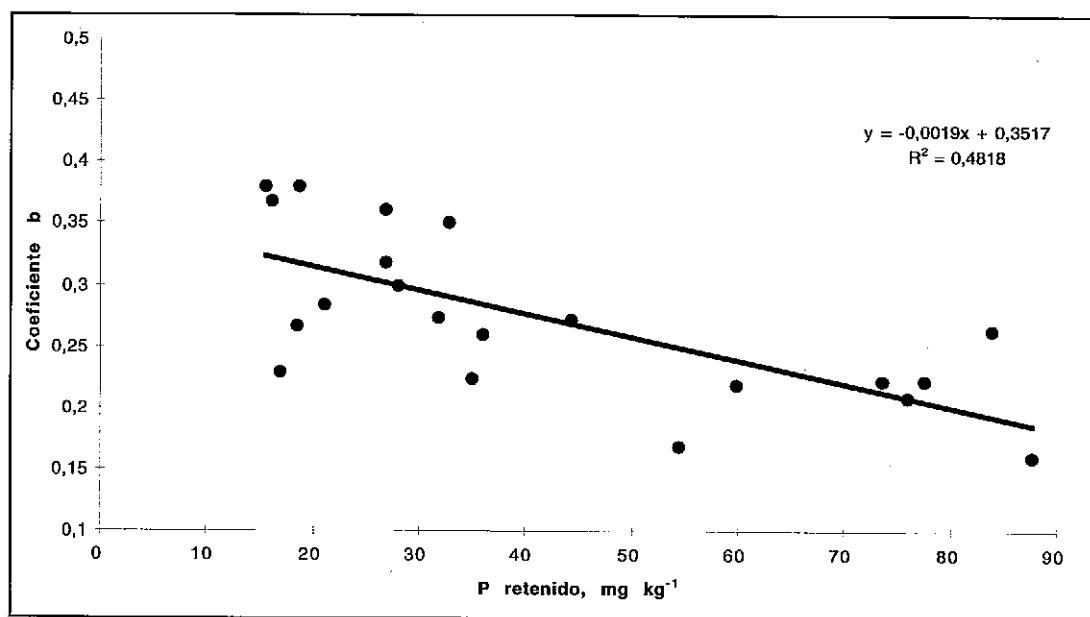


Figura 6. Relación entre la pendiente de las relaciones fósforo agregado-fósforo absorbido (coeficiente b) y el índice de fósforo retenido por la fase sólida del suelo para mantener 0.2 mg L⁻¹ en la solución, calculado en base a la ecuación ajustada con los puntos más bajos de agregado de fósforo a la muestra de suelo (P_{0.2(4p)}).

CONCLUSIONES

- En los estudios de isotermas de retención de fósforo se encontraron diferencias entre los suelos estudiados en términos de retención del fósforo agregado. Dichas diferencias estuvieron relacionadas con el contenido de óxidos de hierro, arcilla y aluminio intercambiable.

- Los suelos desarrollados a partir de materiales del Basamento Cristalino, lavas basálticas y Sedimentos Pelíticos Grises mostraron altos valores de retención de fósforo. Por otra parte, suelos desarrollados a partir de sedimentos arenosos (areniscas triásicas y cretácicas) mostraron bajos índices de retención de fósforo.

- En las evaluaciones realizadas en condiciones de invernáculo, hubo diferencias en las cantidades de fósforo absorbido por las plantas por unidad de fósforo agregado para los diferentes suelos, lo cual indica una diferente eficiencia de uso del fósforo agregado.

- Los índices de retención de fósforo evaluados en condiciones de laboratorio se correlacionaron significativamente con parámetros evaluados a través de la planta, de tal forma que en aquellos suelos donde el valor del índice de retención fue más alto, la eficiencia de uso por la planta del fósforo agregado fue menor.

- El índice P_{0.2(4p)} que evalúa la retención de fósforo a concentraciones de fósforo en la solución similares a las ocurridas a nivel de campo fue el que mostró las mejores correlaciones con los parámetros evaluados a través de la planta.

- Los índices de retención calculados en base a un valor puntual (P₆₀₀ y P₁₀₀₀) podrían ser más prácticos de implementar en análisis de suelo de rutina como parámetros de caracterización de retención de fósforo.

BIBLIOGRAFIA

- BACHE, B.W. and WILLIAMS, E.G. 1971. A phosphate sorption index for soils. *J. Soil Sci.* 22:289-301.
- BARROW, N.J. 1973. Relationship between a soil's ability to adsorb phosphate and the residual effectiveness of superphosphate. *Aust. J. Soil Res.* 11: 57-63.
- BARROW, N.J. 1978. The description of phosphate adsorption curves. *J. Soil Sci.* 29:447-462.
- BARROW, N.J. 1980. Evaluation and utilization of residual phosphorus in soils. In: Khasawneh, F.E. *et al.* (eds.) *The Role of Phosphorus in Agriculture*. Madison, Wis. American Society of Agronomy. pp 333-359.
- BARROW, N.J. and CARTER, E.D. 1978. A modified model for evaluating residual phosphate in soil. *Aust. J. Agric. Res.* 29:1011-1021.
- CAYOTA, S.; FREIRÍA, H. y PETRAGLIA, C. 1981. Caracterización física, química y mineralógica de algunos suelos de las asociaciones Arroyo Blanco, Los Mimbres, Fraile Muerto y Zapallar (Dpto. de Cerro Largo). Tesis Ing. Agr. Universidad de la República, Facultad de Agronomía. 261p.