

CINETICA DE RETENCION DE FOSFORO EN SUELOS AGRICOLAS DE ORIGEN ALUVIAL Y VOLCANICO¹

Kinetics of phosphorus retention in agriculture soils of alluvial and volcanic origin

María Adriana Carrasco R.², Ximena Tapia O.², José D. Opazo A.² y Carlos Benavides Z.²

SUMMARY

The kinetics of phosphorus retention was studied in 16 surface soils: 8 alluvial (central land) and 8 volcanic (south land). A shaking method for 72 hours, a soil/solution ratio of 1/20 and solutions containing 0.258 and 1.033 mmol P/L for the alluvial and volcanic soils, respectively, were used.

Two kinetics step were detected. In the alluvial soils, the first took from 8 to 16 h and the second showed an asymptotic behaviour, while, in the volcanic soils the first took from 2 to 4 h and the second showed a state of equilibrium.

The data were adjusted to the modified Elovich equation obtaining high determination coefficients for the alluvial soils and Ultisols ($R^2 = 0,946$ to $0,997$), and slightly lower for the Andepts ($R^2 = 0,858$ to $0,897$). The α and β constants varied with the type of soil; for the volcanic soils α was 10 to 1000 times greater than for the alluvial soils, and was correlated ($P < 0.01$) to pH in KCl, extractable Al at pH 4.8, Al-oxalate, Si-oxalate and water retention at 33 kPa. For the alluvial soils α was not correlated to the measured properties neither an effect of CaCO_3 was detected.

The β constant was 10 times higher for the alluvial soils. It was not correlated to the analyzed properties.

It is postulated that: 1) the dominant mechanism for the P retention would be one of chemical adsorption, 2) it would also occur a more physical adsorption (slow step) for the alluvial soils, and 3) the modified Elovich equation is adequate to interpret the kinetics of P retention for the volcanic soils.

Key words: alluvial soil, volcanic soil, Andepts, Ultisols, phosphorus adsorption.

INTRODUCCION

Una metodología para estudiar el comportamiento del P en los suelos es a través de su cinética de retención (término que de preferencia se usará, ya que la adsorción no es el único mecanismo responsable de la desaparición del P de la solución), es decir, determinando la adsorción de P (agregado en una cantidad constante), en función del tiempo de contacto del suelo con la solución.

En Chile, se han realizado muy pocos estudios en relación con la cinética de adsorción de P en los suelos. Alamos y otros (1967) investigaron la cinética de cinco suelos derivados de cenizas volcánicas en función del P remanente en la solución, ajustando sus resultados a la ecuación $\log(P)_{\text{sol}} = K_1 \log(t) + K_2$, donde K_1 se relacionaba con el contenido de Al extraíble a pH 4,8. Vanderdeelen, Pino y Baert (1973), al estudiar el suelo Santa Bárbara, encontraron que la adsorción ocurría en dos etapas: una rápida que la atribuyeron a quimisorción y una lenta debida a difusión intraparticular.

Chien y Clayton (1980) y Sparks (1985) señalan que la cinética de las reacciones en arcillas minerales y suelos ha sido descrita de distintas maneras: por una ecuación cinética de primer orden; una combinación de dos o tres reacciones simultáneas de primer orden; una ley de difusión parabólica; y por una ecuación de segundo orden.

¹Recepción de originales: 23 de marzo de 1993.
Investigación financiada por FONDECYT, Proyecto Nº 90/1292.
Parte de la Memoria de título del segundo autor, para postular al título de Químico de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas de la Universidad de Chile.

²Departamento de Ingeniería y Suelos, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad de Chile, Casilla 1004, Santiago, Chile.

La ecuación de Elovich, desarrollada primero para describir la cinética de quimisorción de gases sobre superficies sólidas (Low, 1960), fue modificada por Chien y Clayton (1980), y aplicada exitosamente a datos de retención de P en suelos. La ecuación es:

$$q = (1/\beta) \ln(\alpha\beta) + (1/\beta) \ln t$$

donde:

q = cantidad de P adsorbido.

α y β = constantes.

Se debe cumplir que $\alpha\beta t \gg 1$.

Chien y Clayton (1980) determinaron que α y β pueden usarse para comparar la velocidad de la reacción de adsorción de fosfatos en distintos tipos de suelo. Sin embargo, Sparks (1985) sostiene que la velocidad de reacción para los diferentes suelos es cuestionable, ya que las pendientes de la ecuación modificada de Elovich dependen de la cantidad de P agregada y de la relación suelo: solución utilizada.

En el presente trabajo se analiza la cinética de retención de fósforo y la aplicabilidad de la ecuación modificada de Elovich a suelos agrícolas de origen aluvial y volcánico, que abarcan distintas zonas agroecológicas de Chile.

MATERIALES Y METODOS

Se utilizaron muestras de la capa arable (0-20 cm), de 16 series de suelos, ocho de origen aluvial (sin y con carbonato de calcio) y ocho de origen volcánico con distinto grado de evolución (Andepts y Ultisoles). La clasificación taxonómica y las clases texturales de los suelos se indican en el Cuadro 1.

Las muestras de suelo se secaron al aire y se pasaron por tamiz de 2 mm. Las muestras de origen volcánico se secaron sólo parcialmente al aire, para evitar cambios irreversibles.

CUADRO 1. Clasificación y clases texturales de los suelos

TABLE 1. Classification and textural classes of the soils

Serie	Clasificación taxonómica	Clase textural USDA
Suelos aluviales sin carbonato de calcio ¹		
Colina 1	Fluventic Haploxeroll	Franco
O'Higgins-M	Ultic Haploxeroll	Franco arcillo
O'Higgins-G	Ultic Haploxeroll	Franco arenoso
Suelos aluviales con carbonato de calcio		
Colina 2	Fluventic Haploxeroll	Franco arcillo
Cholqui	Typic Xerochrept	Arcilloso
Maipo 1	Typic Haploxeroll	Franco arcillo
Maipo 2	Typic Haploxeroll	Arcillo arenoso
Linderos	Typic Xerochrept	Arcillo arenoso
Suelos Andepts ²		
Santa Bárbara	Ashy, medial mesic, Typic Dystrandept	Franco
Victoria	Medial, mesic, Entic Dystrandept	Franco arcillo
Puerto Octay	Medial, isomesic, Typic Dystrandept	Franco limoso
Corte Alto	Ashy, mesic, Typic Dystrandept	Franco arcillo limoso
Suelos Ultisoles ²		
Collipulli	Fine, mexic, Xeric Palehumult	Arcillo limoso
Metrengo	Fine, mesic, Palehumult	Franco arcillo limoso
Cudico	Fine, metahalloysitic, mesic, Typic Palehumult	Arcillo limoso
Fresia	Fine, halloysitic, mesic, Typic Palehumult	Arcilloso

¹Walter Luzio L., Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad de Chile, datos no publicados.

²Mella y Kühne (1985).

Las propiedades químicas y físicas más relevantes, medidas según la metodología recomendada por Page, Miller y Keeney (1982), se indican en los cuadros 2 y 3. La capacidad de intercambio catiónico fue medida por el método del acetato de sodio a pH 8,2, utilizando centrifugación, y el exceso de ion saturante se lavó con etanol hasta que la con-

ductividad eléctrica de dos lavados consecutivos variara en menos de un 10%. El hierro libre fue medido por el método del citrato-ditionito, modificado por Holmgren (Page, Miller y Keeney, 1982). La fijación de fósforo fue medida por el método de Saunders (1965) y expresada en mg de P/kg suelo.

CUADRO 2. Propiedades químicas y físicas de los suelos de origen aluvial

TABLE 2. Chemical and physical properties of the soils of alluvial origin

Serie	pH (1:2,5)				Cationes intercambiables					CaCO ₃ libre %	Fe Fijación P _i mg/kg	Arcilla %	Retención hum. 33 kPa	
	H ₂ O	KCl 1M	MO ¹ %	CE ² ds/m	Ca	Mg	K	Na	CIC					
					cmol(+)/kg									
Suelos sin carbonato														
Colina 1	7,7	6,4	1,5	1,41	27,4	3,9	0,99	0,72	32,6	0,0	1,8	1,411	21,2	20,8
O'Higgins-G	6,5	5,4	3,6	0,82	17,6	1,9	0,66	0,61	22,5	0,0	2,7	953	28,4	22,9
O'Higgins-M	7,0	5,7	3,2	0,55	16,5	1,7	1,06	0,58	23,4	0,0	2,0	1,075	28,3	23,3
Suelos con carbonato														
Colina 2	8,0	7,1	1,6	1,94	n.a. ³	n.a.	0,91	1,36	38,0	1,7	4,0	1,251	30,8	24,0
Cholqui	8,0	7,2	3,9	1,21	n.a.	n.a.	0,85	0,95	27,6	3,0	4,9	971	46,2	30,4
Maipo 1	7,9	7,2	2,7	2,89	n.a.	n.a.	0,85	0,93	18,7	3,9	1,7	761	28,0	23,3
Maipo 2	8,0	7,4	1,6	1,42	n.a.	n.a.	0,63	0,62	13,2	4,1	1,5	678	35,7	17,2
Linderos	8,0	7,3	2,0	1,72	n.a.	n.a.	0,70	0,99	15,1	1,5	3,4	621	38,9	19,8

¹MO: materia orgánica.

²CE: conductividad eléctrica.

³n.a.: no analizado por presencia de carbonatos.

CUADRO 3. Propiedades químicas y físicas de los suelos volcánicos relacionadas con la retención de fósforo

TABLE 3. Chemical and physical properties of the volcanic soils related to the retention of phosphorus

Serie	pH (1:2,5)			CIC	Acidez total cmol(+)/kg	H interc.	Al KCl 1M	Al pH 4,8	Al oxa-lato ácido	Fe oxa-lato ácido	Si oxa-lato ácido	Fe libre	Fijación P _i mg/kg	Arcilla %	Retención hum. 33 kPa
	H ₂ O	KCl 1M	MO ¹ %												
Suelos Andepts															
Sta. Bárbara	5,14	4,40	8,60	29,00	33,30	1,29	1,62	6,74	1,28	0,86	0,11	5,0	5.190	24,7	40,7
Victoria	5,40	4,50	9,50	38,90	36,20	0,53	0,71	6,63	1,34	1,11	0,14	5,3	5.097	34,0	42,0
Pto. Octay	5,55	5,09	20,20	50,70	52,80	0,00	0,18	11,50	5,43	1,56	2,16	3,5	7.129	24,2	84,0
Corte Alto	5,20	4,55	18,40	44,70	43,00	0,37	0,48	5,34	1,59	1,44	0,26	2,6	5.597	34,6	58,5
Suelos Ultisoles															
Collipulli	5,11	4,25	6,07	28,70	29,50	1,19	1,38	4,80	0,63	0,84	0,06	6,3	3.705	40,4	31,7
Metrengo	5,23	4,25	6,00	24,90	23,60	0,95	1,21	3,64	0,63	1,33	0,06	3,2	3.478	34,6	35,8
Cudico	5,60	4,56	8,20	26,90	30,40	0,16	0,27	2,60	0,59	1,26	0,09	6,4	3.858	42,2	40,8
Fresia	5,10	4,28	8,50	21,90	28,00	1,11	1,25	3,95	0,63	0,99	0,09	3,7	3.566	46,0	37,8

¹MO: materia orgánica.

²Determinada en suelo húmedo por el método de Saunders, y expresada sobre suelo seco a 105 °C.

Cinética de adsorción de fósforo

A fin de establecer los rangos de concentración de fosfato, los tiempos necesarios de agitación para alcanzar el equilibrio y la concentración de electrolito, se hicieron algunos ensayos preliminares. Para ello, se utilizaron dos suelos de origen aluvial y dos de origen volcánico.

Rango de concentración de P. A muestras de 1 g de suelo, colocadas en tubos de centrifuga secos, se agregaron 20 mL de una solución con 0,129 mmol de P/L (4 mg/kg) como KH_2PO_4 para los suelos de origen aluvial y con 1,032 mmol de P/L (32 mg/kg) para los de origen volcánico. Las soluciones de fosfato se prepararon en KCl 0,01 M. Para evitar el crecimiento bacteriano se agregaron dos gotas de tolueno a cada tubo.

Tiempo de agitación. Los tubos con las suspensiones se agitaron mecánicamente a temperatura controlada de 25 ± 1 °C durante 15, 30, 60, 120, 240 minutos y 8, 16, 24, 48, 96 y 144 horas. En seguida, se centrifugó a 4.500 rpm durante 20 minutos y se analizó fósforo en el sobrenadante mediante el método de Murphy y Riley (1962), leyendo a 880 nm. A partir de la diferencia entre el P agregado y el P remanente en la solución, se calculó el P retenido por el suelo. Los resultados obtenidos corroboraron la dependencia de la capacidad de retención de P del tipo de suelo y muestran que la tendencia al estado de equilibrio también varía con el tipo de suelo; en los suelos de origen aluvial se observó en torno a las 24 horas mientras que en los de origen volcánico a las 16 horas. Se concluyó que 72 horas de agitación eran suficientes para medir la cinética.

Electrolito soporte. Para medir el efecto de la concentración del electrolito soporte sobre la retención de fosfato, se utilizaron ambos tipos de suelos. Dos suelos de origen aluvial se trataron con 0,258 mmol de P/L y dos de origen volcánico con 1,032 mmol de P/L, ambas soluciones preparadas en KCl 0,01 y 0,02 M, respectivamente. El tiempo de agitación fue de 24 horas. El aumento en la concentración del KCl tuvo efecto sólo en los suelos de origen aluvial (Cuadro 4).

Medición de la cinética de adsorción de P. Se usaron 0,258 mmol de P/L para los suelos de origen aluvial y 1,033 mmol de P/L para los volcánicos, con excepción de los suelos Puerto Octay y Corte Alto. Al primero, por su alta capacidad de fijación de P, medida por el método de Saunders (Cuadro 3), se le aplicó una solución de 2,07 mmol de P/L. Al suelo Corte Alto, por estar dentro de los suelos de origen volcánico que presentaban una fijación

de P parecida (Cuadro 3), se le aplicó una dosis de P menor (0,775 mmol de P/L) a fin de investigar su efecto sobre los parámetros cinéticos.

CUADRO 4. Retención de fósforo al tratar cuatro suelos con KH_2PO_4 en KCl 0,01 y 0,02 M durante 24 horas

TABLE 4. Retention of phosphorus when treating four soils with KH_2PO_4 in 0.01 and 0.02 M KCl for 24 hours

	P adsorbido al usar	
	KCl 0,01 M	KCl 0,02 M
	mmol de P/kg	
Aluviales	P agregado: 0,258 mmol de P/L	
Linderos	1,7	1,8
Colina 1	1,8	2,0
Volcánicos	P agregado: 1,032 mmol de P/L	
Santa Bárbara	25,7	25,7
Cudico	22,0	22,0

El tiempo de agitación fue de 5, 10, 15, 30 minutos y 1, 2, 4, 8, 16, 24, 48 y 72 horas. En cuanto al electrolito soporte, en los suelos de origen aluvial se utilizó KCl 0,02 M por estar más próximo a la composición de la solución del suelo. En los suelos volcánicos, como la concentración del KCl no afectó la adsorción del fosfato se usó KCl 0,01 M, ya que estos suelos normalmente tienen una conductividad eléctrica baja.

RESULTADOS

En las figuras 1 y 2 se muestra la retención de P en función del tiempo para los suelos de origen aluvial y volcánico, respectivamente. La capacidad de retención de P en los suelos aluviales fue aproximadamente 10 veces menor que en los suelos volcánicos. Las curvas de la Figura 1 indican que la presencia de CaCO_3 en los suelos analizados no tiene un efecto notorio sobre la cinética de retención de P en los suelos de origen aluvial investigados. Esto corrobora lo encontrado por McLaughlin, Ryden y Syers (1981), quienes sostienen que el CaCO_3 , como tal, no sería tan importante en la retención de P como se sostuvo en el pasado. Holford y Mattingly (1975a, 1975b) sugieren que la retención de P en suelos con CaCO_3 estaría controlada por la superficie específica del CaCO_3 y la presencia de impurezas de óxidos hidratados de Fe.

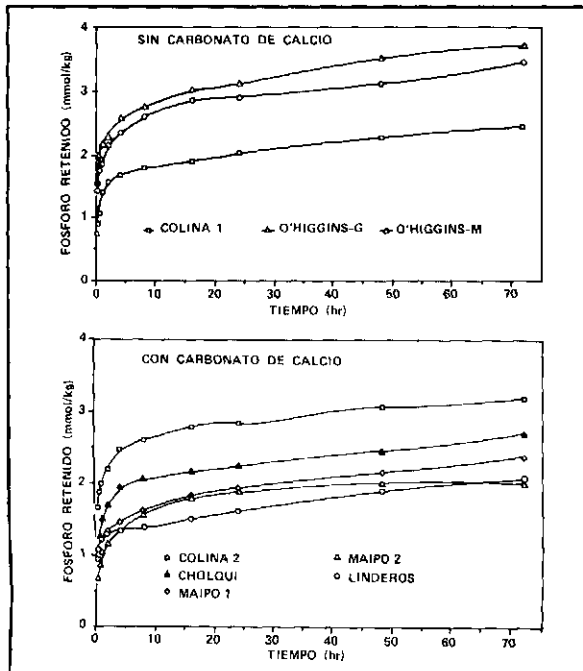


FIGURA 1. Retención de fósforo en función del tiempo en los suelos de origen aluvial. Sin carbonato de calcio y con carbonato de calcio.

FIGURE 1. Phosphorus retention in function of time for the soils of alluvial origin. With calcium carbonate and without calcium carbonate.

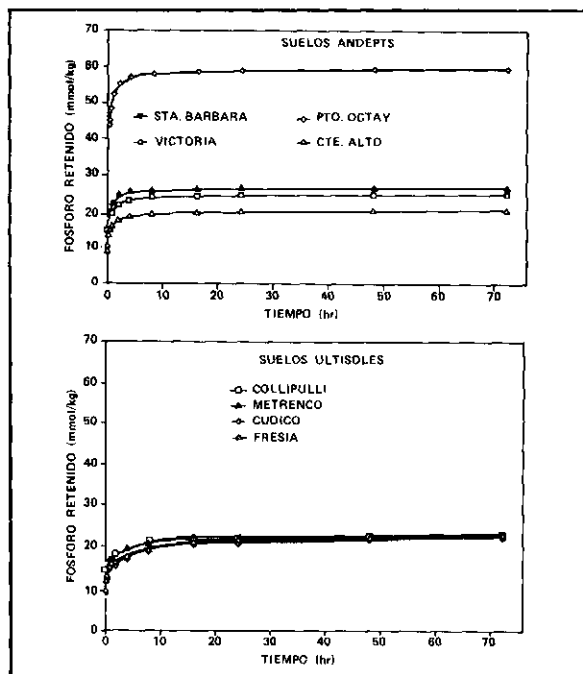


FIGURA 2. Retención de P en función del tiempo en los suelos volcánicos. Suelos Andepts y suelos Ultisoles.

FIGURE 2. Phosphorus retention in function of time for the volcanic soils. Andept soils and Ultisol soils.

Entre los suelos volcánicos, los suelos menos evolucionados (Andepts) fueron los más reactivos. Destaca la alta capacidad de retención de P del suelo Puerto Octay, comportamiento ya detectado por Schalscha, Nieto y Bingham (1973) y por Bustos (1992). El suelo Corte Alto presentó una adsorción menor de P, porque se le aplicó una dosis de P un 25% más baja.

En cuanto al factor tiempo, en ambos tipos de suelo (aluviales y volcánicos) se observan dos etapas, las que indicarían que serían, al menos, dos los procesos que están ocurriendo en forma simultánea, tal como lo afirma Schalscha, Nieto y Bingham (1973) para la adsorción de P en suelos volcánicos. La primera etapa es rápida y en el caso de los suelos de origen aluvial termina entre las 8 y 16 horas, mientras que en el caso de los suelos volcánicos termina entre las 2 y 4 horas. La segunda etapa es más lenta y la curva tiende a ser asintótica después de las 16 horas en los suelos de origen aluvial y, muestra un estado de equilibrio en los suelos volcánicos.

El comportamiento cinético de los suelos volcánicos es similar al de la goetita. Según datos de Yekini, citado por Sadzawka y Carrasco (1985), la primera etapa en la goetita demora tres horas y la segunda entre 3 y 18 horas.

Al calcular los porcentajes de retención de P a los distintos tiempos de agitación, llama la atención que en los suelos aluviales a las 72 horas se ha retenido entre un 38 y 70% del P agregado; en cambio, en los suelos volcánicos a las 4 horas ya se ha retenido más de un 90% en los Andepts, y entre un 72 y 86% en los Ultisoles. Estos resultados indican que los mecanismos de retención de P difieren según el tipo de suelo.

Al ajustar los datos de retención de P a la ecuación modificada de Elovich, se obtuvo un muy buen ajuste como se observa en las figuras 3 y 4; en todos los casos los coeficientes de determinación fueron significativos (Cuadro 5).

Constantes cinéticas

Los valores de las constantes α y β calculadas (Cuadro 5) muestran que éstas varían en relación al tipo de suelo. En general, en los suelos de origen aluvial α fue del orden 10 a 1.000 veces menor que en los suelos de origen volcánico. Entre los suelos volcánicos, el suelo Puerto Octay presentó un valor de α mucho mayor que el resto de los suelos, fue más de mil veces el valor del suelo Santa Bárbara, que le sigue en magnitud. Respecto de los valores de β , en los suelos aluviales fueron del orden de 10 veces mayores que en los volcánicos.

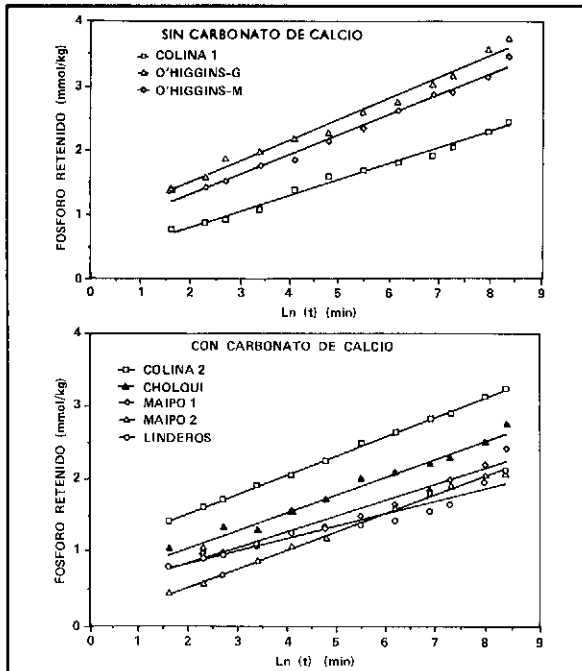


FIGURE 3. Ecuación modificada de Elovich para la retención de P en los suelos de origen aluvial. Sin carbonato de calcio y con carbonato de calcio.

FIGURE 3. Modified Elovich equation for the P retention in soils of alluvial origin. With calcium carbonate and without calcium carbonate.

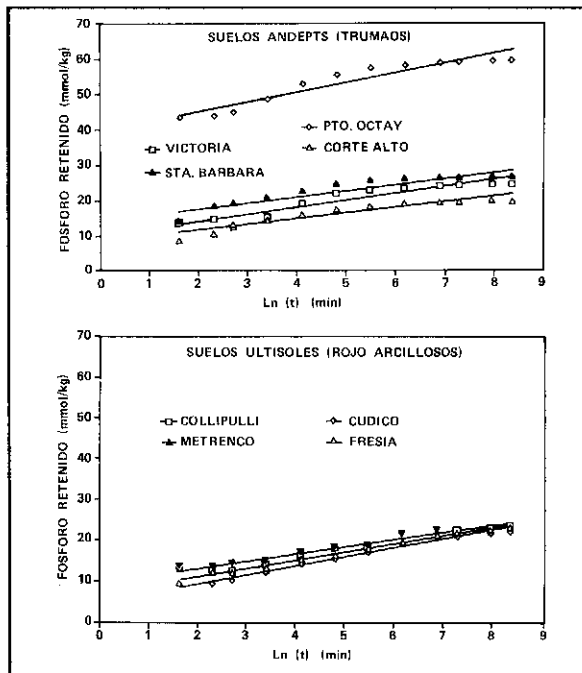


FIGURE 4. Ecuación modificada de Elovich para la retención de P en los suelos volcánicos. Suelos Andepts y suelos Ultisoles.

FIGURE 4. Modified Elovich equation for the P retention in volcanic soils. Andept soils and Ultisol soils.

CUADRO 5. Valores calculados de α y β y coeficientes de determinación de la ecuación modificada de Elovich para la sorción de fosfato en suelos de origen aluvial y volcánico

TABLE 5. Calculated values of α and β and determination coefficients of modified Elovich equation for the retention of phosphorus in soils of alluvial and volcanic origin

Suelos	α mmol P $\text{kg}^{-1} \text{min}^{-1}$	β (mmol de P/kg) $^{-1}$	R^2
De origen aluvial			
a) Sin CaCO_3			
Colina 1	0,79	4,10	0,985
O'Higgins (Machalí)	4,69	3,12	0,983
O'Higgins (Graneros)	3,32	3,30	0,982
b) Con CaCO_3			
Colina 2	10,88	3,80	0,997
Cholqui	2,31	4,13	0,981
Maipo 1	1,26	4,61	0,968
Maipo 2	0,27	4,02	0,994
Linderos	3,56	6,06	0,946
De origen volcánico			
a) Andepts			
Santa Bárbara	8.967	0,609	0,859
Victoria	361	0,518	0,883
Puerto Octay	11.440.000	0,383	0,897
Corte Alto	448	0,651	0,871
b) Ultisoles			
Collipulli	657	0,603	0,969
Metrengo	219	0,567	0,961
Cudico	23	0,466	0,979
Fresia	66	0,504	0,990

Los valores de α se correlacionaron significativamente ($P \leq 0,01$) con algunas propiedades químicas y físicas sólo en los suelos de origen volcánico. Las propiedades relacionadas fueron el pH en KCl ($r = 0,884$), el Al extraíble a pH 4,8 ($r = 0,856$), el Al oxalato ($r = 0,970$) y Si oxalato ($r = 0,996$) y la retención de humedad a 33 kPa ($r = 0,888$). La acidez total dio un coeficiente de correlación más bajo, pero también significativo ($r = 0,785$; $P \leq 0,05$). Todas estas propiedades están relacionadas también con la retención de P, según lo encontrado por Bustos (1992) en un estudio de retención de P con los mismos suelos del presente trabajo, lo cual indica que la ecuación modificada de Elovich sería un buen modelo para interpretar la cinética de sorción de P en los suelos volcánicos.

En los suelos aluviales α no se correlacionó con las propiedades químicas y físicas mostradas en el Cuadro 2 aun cuando en el caso de los suelos con CaCO_3 se esperaba un efecto del Fe libre sobre la retención de P; según McLaughlin, Ryden y Syers (1981) y Ryan, Curtin y Cheema (1985), los óxidos de hierro en suelos calcáreos parecen estar directamente involucrados en la adsorción de fósforo. La materia orgánica, los óxidos de hierro libre y la arcilla, relacionadas según Carrasco y otros (1990), a los máximos de retención de P en algunos suelos aluviales, tampoco estarían asociadas a la cinética de retención de P.

Al ordenar los suelos según valores crecientes de α se encontró que el suelo Santa Bárbara, aun cuando tiene propiedades muy similares a las del suelo Victoria (Cuadro 3), presenta un valor de α mucho mayor (Cuadro 5). Posiblemente por la ubicación geográfica y las condiciones climáticas el Fe libre es mucho más activo en el suelo Santa Bárbara. El alto valor de α para el suelo Puerto Octay muestra una gran sensibilidad de la constante al grado de reactividad de los suelos, expresado en las propiedades químicas medidas, cuyos valores extremos, con excepción del Fe libre, fueron para el suelo Puerto Octay (Cuadro 3). En los Ultisoles la variación de α estaría asociada al aluminio hidroxilado (Al pH 4,8) y al grado de reactividad del Fe libre más que a su cantidad.

La constante β para el suelo Corte Alto estuvo dentro del rango de los valores obtenidos para los suelos con fijación de P similar (cuadros 3 y 5). Ello estaría indicando que el efecto de la reactividad del suelo está por sobre el efecto del factor concentración en la medición de α . De todas maneras, para fines comparativos, sería preferible que al medir la cinética de retención de P en suelos de un mismo tipo, se trabaje agregando una misma concentración de P.

Tanto en los suelos de origen aluvial como volcánico, la constante β no se correlacionó con ninguna de las propiedades analizadas.

DISCUSION

La forma de las curvas cinéticas para los suelos aluviales (Figura 1) indican que la primera etapa del proceso de retención de P correspondería a una reacción de adsorción y la segunda a reacciones de precipitación y difusión intraparticular, las que normalmente son más lentas. Estos resultados son coincidente con los de Holford y Mattingly (1975a), quienes encontraron que en suelos calcáreos (0,8 a 24,2% de CaCO_3) la adsorción de fosfatos ocurre en una superficie de alta energía (quimisorción) y

en otra de baja energía (adsorción física y precipitación), siendo el primer proceso, rápido y el segundo, lento.

La falta de correlación entre α y las propiedades químicas y físicas medidas en los suelos de origen aluvial, indicaría que los mecanismos de las reacciones que regulan la velocidad de retención de P en estos suelos, no estarían relacionados directamente a las propiedades medidas. Si se postula que el mecanismo más probable es la precipitación, la falta de correlación entre α y pH podría explicarse por el hecho de que este factor actuaría en interacción con la actividad de los iones involucrados (Ca y Mg, por ejemplo). Ya que no se dispone de valores de estos últimos no se puede probar esta hipótesis.

Dado que en el caso de los suelos de origen aluvial se obtuvo un alto coeficiente de determinación para la descripción matemática de los datos cinéticos con la ecuación modificada de Elovich, lo anterior implica que las propiedades medidas no serían las más adecuadas para interpretar la cinética de retención de P en los suelos aluviales.

En los suelos volcánicos, la forma de las curvas de cinética de retención de P (Figura 2), permiten postular que el mecanismo dominante a las concentraciones de P usadas (1 a 2 mmol de P/L) sería el de adsorción. Según Holford, Wedderburn y Mattingly (1974) cuando se trabaja con concentraciones de equilibrio menores de 1 mmol de P/L se pueden descartar otros mecanismos de retención de P distintos al de adsorción. El mecanismo de adsorción se ve corroborado por los resultados de Ryden, McLaughlin y Syers (1977a), quienes han demostrado que la desaparición de P de la solución a tiempos menores de 24 a 48 horas en suelos dominados por constituyentes amorfos a los rayos X y en goetita sintética, se debe al proceso de adsorción específica o quimisorción. Barrow (1980) también dice que a bajas concentraciones el fosfato estaría unido químicamente a las superficies de óxidos de Fe y Al por enlaces químicos específicos.

De acuerdo con Ryden, McLaughlin y Syers (1977b), el comportamiento cinético de los suelos volcánicos sería similar al de la adsorción de P sobre los hidróxidos amorfos de Fe y Al, y el efecto del tiempo sobre la retención o sorción de P en estos suelos se podría atribuir a tres mecanismos: (i) quimisorción en los sitios superficiales protonados, (ii) quimisorción por reemplazo de los hidroxilos superficiales y (iii) una sorción de P más física como un ion determinante del potencial, que ocurre cerca de la superficie modificada.

La forma de las curvas cinéticas de los suelos volcánicos (Figura 2) indica que el mecanismo (iii) no estaría presente. Corroboró la ausencia de este mecanismo el resultado del ensayo preliminar para determinar el efecto de la concentración del electrolito soporte, en el cual la retención de P no fue afectada por dicho factor (Cuadro 4). Según lo encontrado por Ryden, Syers y McLaughlin (1977), sólo el mecanismo de sorción, dependiente de los

iones determinantes del potencial, se ve afectado por la concentración de electrolito.

La relación existente entre α y algunas propiedades químicas del suelo responsables de la retención de P en los suelos volcánicos corroboran el trabajo de Chien y Clayton (1980) que mostró que la ecuación modificada de Elovich es aplicable a este tipo de suelo.

RESUMEN

Se estudió la cinética de retención de fósforo en 16 suelos superficiales, 8 aluviales (zona central) y 8 volcánicos (zona sur). Se empleó el método de agitación hasta 72 horas utilizando una relación suelo/solución de 1/20 y soluciones de 0,258 y 1,033 mmol de P/L para los suelos aluviales y volcánicos, respectivamente.

Se detectaron dos etapas cinéticas. En los suelos aluviales la primera duró 8 a 16 horas y la segunda tuvo un comportamiento asintótico, mientras que en los suelos volcánicos la primera duró de 2 a 4 horas y en la segunda se alcanzó un estado de equilibrio.

Los datos se ajustaron a la ecuación modificada de Elovich, obteniéndose coeficientes de determinación altos para los suelos aluviales y Ultisoles ($R^2 = 0,946$ a $0,997$), y ligeramente menores en el caso de los Andepts ($R^2 = 0,859$ a $0,897$). Las constantes α y β variaron con el tipo de suelo; en los volcánicos, α

fue de 10 a 1.000 veces mayor que en los suelos aluviales y, correlacionó ($P \leq 0,01$) con el pH en KCl, Al extraíble a pH 4,8, Al-oxalato, Si-oxalato y retención de agua a 33 kPa. En los suelos aluviales α no correlacionó con ninguna de las propiedades medidas y tampoco se detectó efecto del CaCO_3 .

La constante β fue 10 veces más alta en los suelos aluviales. No correlacionó con las propiedades analizadas.

Se postula que: 1) el mecanismo dominante en la retención de P sería el de adsorción química, 2) en los suelos aluviales también ocurriría una adsorción más física (etapa lenta) y 3) la ecuación modificada de Elovich permitiría interpretar la cinética de retención de P en los suelos volcánicos.

Palabras claves: suelo aluvial, suelo volcánico, Andepts, Ultisoles, adsorción de fósforo.

LITERATURA CITADA

- ALAMOS O., PABLO, BEHRENS L.B., HAROLD, ACEVEDO H., EDMUNDO, LOPEZ E., ANA y PALMA D., TERESA. 1967. Relaciones suelo-fósforo en suelos derivados de cenizas volcánicas. *Agricultura Técnica* 27: 120-129.
- BARROW, N.J. 1980. Evaluation and utilization of residual phosphorus in soils. In: Khasawneh, F.E., Sample, E.C. and Kamprath, E.J. (ed.). *The role of phosphorus in agriculture*. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, USA. p.: 333-359.
- BUSTOS J., JORGE. 1992. Capacidad de retención y liberación de fósforo en suelos de origen volcánico. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Santiago, Chile. (Tesis para optar al título de Ing. Agr.) 96 p.
- CARRASCO R., MARIA ADRIANA, OPAZO A., JOSE DOMINGO, PERALTA V., INES, y VERA Q., LUISA. 1990. Retención de fósforo en suelos de zonas semiáridas. *Agricultura Técnica (Chile)* 52: 411-415.
- CHIEN, S.H. and CLAYTON, W.R. 1980. Application of Elovich equation to the kinetics of phosphate release and sorption in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 265-268.
- HOLFORD, I.C.R. and MATTINGLY, G.E.G. 1975a. The high- and low-energy phosphate adsorbing surfaces in calcareous soils. *J. Soil Sci.* 26: 407-417.
- HOLFORD, I.C.R. and MATTINGLY, G.E.G. 1975b. Phosphate sorption by Jurassic oolitic limestone. *Geoderma* 13: 257-264.

- HOLFORD, I.C.R., WEDDERBURN, R.W.M. and MATTINGLY, G.E.G. 1974. A Langmuir two-surface equation as a model for phosphate adsorption by soils. *Journal of Soil Science* 25: 242-255.
- LOW, M.J.D. 1960. Kinetics of chemisorption of gases on solids. *Chem. Reviews* 60: 267-312.
- McLAUGHLIN, J.R., RYDEN, J.C. and SYERS, J.K. 1981. Sorption of inorganic phosphate by iron- and aluminium-containing components. *Journal of Soil Science* 32: 365-377.
- MELLA L., ARNOLDO y KÜHNE G. ALBERTO. 1985. Sistemática y descripción de las Familias, Asociaciones y Series de suelos derivados de materiales piroclásticos de la zona central-sur de Chile. En: Juan Tosso T. (ed.). *Suelos volcánicos de Chile*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Santiago, Chile. p.: 549-716.
- MURPHY, J. and RILEY, J.P. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta* 27: 31-36.
- PAGE, A.L., MILLER, R.H. and KEENEY, D.R. (ed.). 1982. *Methods of soil analysis*. Part 2, Second edition, American Society of Agronomy, Madison, WI, USA. 1.159 p.
- RYAN, J., CURTIN, D. and CHEEMA, M.A. 1985. Significance of iron oxides and calcium carbonate particle size in phosphate sorption by calcareous soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 74-76.
- RYDEN, J.C., SYERS, J.K., and McLAUGHLIN, J.R. 1977. Effects of ionic strength on chemisorption and potential-determining sorption of phosphate by soils. *J. Soil Sci.* 28: 62-71.
- RYDEN, J.C., McLAUGHLIN, J.R. and SYERS, J.K. 1977a. Time- dependent sorption of phosphate by soils and hydrous ferric oxides. *Journal of Soil Science* 28: 585-596.
- RYDEN, J.C., McLAUGHLIN, J.R. and SYERS, J.K. 1977b. Mechanism of phosphate sorption by soils and hydrous ferric oxide gel. *J. Soil Sci.* 28: 72-79.
- SADZAWKA, R., M. ANGELICA y CARRASCO, R., M. ADRIANA. 1985. Fósforo. En: Juan Tosso T. (ed.). *Suelos volcánicos de Chile*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Santiago, Chile. p.: 373-405.
- SAUNDERS, W.M.H. 1965. Phosphate retention by New Zealand soils and its relationship to free sesquioxides, organic matter and other soil properties. *N.Z. J. Agr. Res.* 8: 30-37.
- SCHALSCHA B., EDUARDO, NIETO B., CECILIA y BINGHAM, F.T. 1973. Algunas características de la fijación de fosfatos en suelos alofánicos de Chile. *Agricultura Técnica (Chile)* 33: 81-86.
- SPARKS, D.L. 1985. Kinetics of ionic reactions in clay minerals and soils. *Adv. Agron.* 38: 231-266.
- VANDERDEELEN, N., PINO, INES and BAERT, L. 1973. Kinetics of phosphate adsorption in a soil derived from volcanic ash. *Turrialba* 25: 291-296.