

# CINÉTICA DE INTERCAMBIO ISOTÓPICO EN SUELOS DERIVADOS DE CENIZAS VOLCÁNICAS. UN MODELO PREDICTIVO<sup>1</sup>

## Isotopic exchange kinetics in soils derived from volcanic ash. A predictive model.

Inés Pino<sup>2</sup>, Walter Luzio<sup>3</sup> y A. M. Parada<sup>2</sup>

### S U M M A R Y

A model to forecast kinetic isotopic exchange was applied to ten soils from the tenth region of Chile with the aim to characterize the kinetic parameters and calibrate a multi-compartmental model of bioavailable P.

The soils were shaken up to equilibrium and then a labeled solution of <sup>32</sup>P was added. The analysis were made at two sampling times. The green malachite method was used to measure the concentration of P in the soil solution and the liquid scintillation method with a Beckman counter LS 5000 was used to measure the initial and the final radioactivity. The quantity, intensity and capacity factors were measured and also the kinetic parameters Fm, Km and Tm.

Values less than 0.02 mgPL<sup>-1</sup> for the intensity factor, and between 0.07 and 2.4 mgPk<sup>-1</sup> for quantity factor were considered to be limiting for crops.

The immediately available pool of P was slightly higher in the Crucero soil under fallow than in the other two management systems. The A, B and C pools showed a relatively homogenous distribution. In the Crucero soil under pines the unique source of P for plants comes from the pool D, which will decrease gradually as it is absorbed by plants. In the Crucero soil with wheat the major part of P is found in the pool A coming from the recent application of fertilizers.

**Key words:** Bioavailable P, predictive model, isotopic exchange kinetics.

### INTRODUCCIÓN

En la literatura existe una gran cantidad de métodos tendientes a cuantificar el fósforo biodisponible en el suelo, la mayor parte de los cuales utiliza diferentes extractantes, a través de técnicas de extracción secuenciales y/o por predicción

de parámetros de respuesta al P de las plantas en función de propiedades químicas del suelo (Carrasco y Opazo, 1995; Chang y Jackson, 1956; Hedley *et al.*, 1982, Frossard *et al.*, 1989). Estos métodos no siempre reflejan la verdadera biodisponibilidad del P del suelo, observándose además que algunos extractantes modifican las propiedades de sorción de las partículas de suelo (Nirel y Morel, 1990).

Debido a que el P isotópicamente intercambiable del suelo es el P biodisponible (Morel y Planchette, 1994; Frossard *et al.*, 1994) este valor puede obtenerse en el sistema solución suelo con un experimento simple usando el método de cinética

<sup>1</sup>Recepción de originales: 7 de enero de 1998.

Trabajo realizado con la colaboración del Organismo Internacional de Energía Atómica. CRP 7499.

<sup>2</sup>Comisión Chilena de Energía Nuclear, Casilla 188-D, Santiago.

<sup>3</sup>Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Casilla 1004, Santiago.

de intercambio isotópico de los iones fosfato entre el suelo y la solución (Fardeau *et al.*, 1995). Así, el P biodisponible puede definirse usando tres factores: 1) Intensidad, que corresponde al potencial químico de los iones fosfatos en la solución suelo; se identifica como la concentración de los iones fosfato en la solución suelo (Cp); 2) Cantidad, que cuantifica la cantidad de todos los iones fosfato del sistema solución suelo (Ei), y 3) Capacidad, que describe la variación del factor Cantidad cuando el factor Intensidad se incrementa por las aplicaciones de P o decrece por la absorción de P por las raíces de las plantas. Este valor es generalmente la relación factor Cantidad/factor Intensidad (Ei/Cp). A estos tres factores es posible agregar un cuarto factor denominado factor Tiempo, ya que la absorción de P por un cultivo es un proceso dependiente del tiempo. Por esta razón, el objetivo de esta investigación es evaluar la cinética de intercambio isotópico a través de un modelo predictivo de fácil aplicación, en suelos derivados de cenizas volcánicas de la X Región del país.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Materiales

Se muestrearon 10 suelos representativos de la X Región del país, entre los paralelos 40° 10' a 41° 30' latitud sur y entre los meridianos 72° 10' y 72° 30' longitud oeste, pertenecientes a los Ordenes Andisols y Ultisols (Soil Survey Staff, 1996), a una profundidad de 0-20 cm (Cuadro 1). Las series de suelos muestreadas fueron: Alerce (AL), Frutillar (FRU), Antillanca (ANT), Chanleufú (CH), Ralún (RAL), Corte Alto (CA), Puerto Fonk (PF), Puyehue (PUY), Fresia (FRE) y Crucero (C). La serie Crucero, se muestreó bajo tres condiciones de manejo: cultivo de trigo (C.TRI), pino (C.PIN) y barbecho (C.BAR). Algunas características químicas se presentan en el Cuadro 1.

Los suelos se agitaron en una relación suelo solución de 1:10 hasta alcanzar el equilibrio, luego se agregó la solución marcada con <sup>32</sup>P considerando a lo menos dos tiempos de muestreo de la solución marcada, en este caso 1 y 10 min.

**Cuadro 1. Clasificación taxonómica y características químicas de los suelos**

**Table 1. Soil classification (Keys to Soil Taxonomy, 1996) and chemical characteristics**

Serie Prof. 0-20cm	Clasificación	pH H <sub>2</sub> O	Al+1/2Fe %	P total ppm	P Olsen ppm
Alerce	Medial isomésica Duric Placaquand	4,6	3,3	1.330	4,2
Frutillar	Medial isomésica Duric Histic Placaquand	4,7	4,8	1.805	9,1
Antillanca	Ashy frígida Typic Udivitrant	5,0	0,7	430	4,4
Chanleufú	Medial Acrudoxic Durudand	4,7	0,9	477	5,4
Ralún	Udivitrant	5,1	1,1	766	4,6
Corte Alto	Medial isomésico Typic Hapludand	4,8	3,3	2.219	5,7
Puerto Fonk	Medial isomésico Typic Hapludand	5,0	4,6	1.648	5,4
Puyehue	Medial isomésico Pachic Melanudand	4,8	2,1	1.077	4,6
Crucero (barbecho)	Typic Paleudult	5,1	1,6	1.470	5,8
Crucero (pino)	Typic Paleudult	5,0	1,5	998	25,8
Crucero (trigo)	Typic Paleudult	5,1	1,4	1.353	19,3
Fresia	Typic Hapludult	4,7	2,0	1.179	1,3

La muestra se filtró a través de membrana de poro 0,2  $\mu\text{m}$  o 0,025  $\mu\text{m}$ . En el filtrado obtenido se determinó la radiactividad remanente en un contador de centelleo líquido Beckman LS 5000. La concentración de fósforo se obtuvo por colorimetría utilizando el método verde de malaquita (Novozamsky *et al.*, 1993).

## 2.2 P Isotópicamente intercambiable en los suelos como P disponible

Se ha demostrado (Fardeau, 1993, Fardeau, 1996), que los iones fosfato isotópicamente intercambiables en el sistema solución suelo representan al P disponible del suelo. Así, para caracterizar el P disponible de un suelo, se requiere determinar las características físico-químicas de los iones fosfato isotópicamente intercambiables en el sistema solución suelo. Para ello se requiere tener en cuenta los siguientes aspectos:

1. El trazador debe ser aplicado al sistema en un tiempo preciso en una única forma química y física y en cantidad conocida, por lo tanto debe ser aplicado solo en la forma de ortofosfato y libre de portador.
2. El sistema debe ser mantenido en estado de equilibrio durante el experimento. Esto significa que la introducción del trazador y la toma de muestra no debe modificar el estado de equilibrio. Como consecuencia de ello, se recomienda aplicar el isótopo sin portador.
3. Las muestras tomadas para el análisis se deben tomar en un tiempo preciso, en un pool preciso y en una forma química precisa.

## 2.3 Fórmulas básicas del modelo

Las fórmulas básicas (Fardeau, 1993), para el cálculo de la cantidad de P isotópicamente intercambiable en un sistema solución suelo y la cantidad de P isotópicamente intercambiable cualquiera que sea el tiempo  $t$  son las siguientes:

Así,

$$R/E_{(t)} = r_{(t)} / q_s \quad (1)$$

$$E_{(t)} = q_s R / r_{(t)} \quad (2)$$

Se ha demostrado que la relación entre  $r_{(t)}$  y  $t$ , expresada en minutos puede describirse por la siguiente fórmula:

$$r_{(t)}/R = r_1/R [t + (r_1/R)^{1/n}]^{-n} + r_{eq}/R \quad (3)$$

En esta relación  $r_{eq}$  es el valor correspondiente a la radiactividad en la solución suelo en su estado de equilibrio final. Se ha demostrado que  $r_{eq}/R = q_s/P_T$  cuando  $P_T$  es el P total del suelo. Finalmente:

$$r_{(t)}/R = r_1/R [t + (r_1/R)^{1/n}]^{-n} + q_s/P_T \quad (4)$$

Así se tiene que:

- R: es la cantidad de radiactividad aplicada, como iones fosfato en un sistema solución suelo.
- $r_{(t)}$ : es la cantidad de radiactividad después de un tiempo  $t$  de intercambio isotópico.
- $E_{(t)}$ : es la cantidad de P isotópicamente intercambiable después de un tiempo  $t$  de intercambio isotópico.
- $q_s$ : es la cantidad de P como iones fosfato en la solución suelo en el estado de equilibrio.
- $P_T$ : P total en el suelo.
- $r_1/R$ : relación entre la radiactividad encontrada en la solución suelo después de un minuto de intercambio isotópico y la radiactividad total aplicada.
- $n$ : exponente de la función que describe la conducta, con un tiempo  $t$  de intercambio, de la radiactividad en la solución.

## 2.4 Cálculo del tamaño de los pools o compartimentos. Funcionamiento del modelo

Cuando se determinan los valores de  $r_{(t)}/R$ ,  $n$ ,  $q_s$  y  $P_T$ , los valores de  $E_{(t)}$  se calculan usando las siguientes relaciones:

$$E_{(t)} = q_s R / r_{(t)} \quad (2)$$

y

$$r_{(t)}/R = r_1/R [ t + ( r_1/R)^{1/n} ]^{-n} + q_s/P_T \quad (4)$$

Generalmente se calcula el tamaño de los siguientes cinco pools:

1. Pool  $E_1$ , el cual corresponde al P instantáneo, isotópicamente intercambiable al primer minuto. Este pool debe considerarse como el pool de los iones fosfato directamente disponible, sin transformación química para las plantas. El tamaño de este pool es:

$$E_1 = 10 C_p [R/r_1] \quad (5)$$

2. Pool [1 día -  $E_1$ ]. Este pool corresponde a la cantidad de fosfato el cual puede ser tomado por una zona dada de una raíz. Esta situación se debe al hecho de que una raíz de una zona puede tomar P con una absorción activa por un tiempo dado, el cual está incluido entre 1 día y 2 días. De hecho se escoge un día y se denomina gráficamente como Pool A. El tamaño del pool es:

$$\text{Pool [1 día] - } E_1 = 10 C_p [R/r_{1440} - R/r_1] \quad (6)$$

donde  $r_{1440}$  se calcula usando la fórmula (4).

3. Pool [1 día - 3 meses]. Este pool corresponde al tiempo de funcionamiento de la raíz de un cultivo y se denomina gráficamente como Pool B. Su tamaño es:

$$\begin{aligned} \text{Pool [3 meses - Pool 1 día]} = \\ 10 C_p [R/r_{129600} - R/r_{1440}] \end{aligned} \quad (7)$$

4. Pool [3 meses - 1 año]. Este pool corresponde a la cantidad de iones fosfato, los cuales pueden ser liberados desde el suelo hacia la solución suelo en menos de 1 año y se denomina gráficamente como Pool C.

Su tamaño es:

$$\begin{aligned} \text{Pool [1 año - Pool 3 meses]} = \\ 100 C_p [R/r_{518400} - R/r_{129600}] \end{aligned} \quad (8)$$

5. Pool intercambiable en más de un año. Este pool corresponde a aquellos muy lentamente intercambiables, los cuales pueden ser liberados a la solución suelo en años en los cuales no se efectúe aplicación de fertilizantes. Se denomina gráficamente como Pool D y corresponde a la habilidad del suelo para liberar fosfato en aquellas condiciones en que la fertilización es cero. Su tamaño es:

$$\text{Pool } > 1 \text{ año} = P_T - 10 C_p [R/r_{518400}] \quad (9)$$

## 2.5 Parámetros cinéticos

Se pueden determinar tres parámetros cinéticos usando los parámetros obtenidos previamente:

1. Tasa media de intercambio de los iones fosfato entre el suelo y la solución. Facilidad de moverse desde el suelo a las raíces en función del tiempo.

$$K_m = n/[r_1/R]^{1/n}$$

2. Tiempo medio de estadía de los iones fosfato en la solución suelo.

$$T_m = 1/K_m = [r_1/R]^{1/n}/n$$

3. Flujo medio de intercambio de los iones fosfato entre la fase sólida y la fase líquida del sistema solución suelo.

$$F_m = 10 C_p K_m$$

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En relación al factor Intensidad se aprecia (Cuadro 2) que en todos los suelos estudiados este valor es muy inferior a  $0,02 \text{ mg PL}^{-1}$ , valor que se considera limitante para el crecimiento de los cultivos (Fardeau, 1997), situación frecuentemente encontrada especialmente en suelos Andisols. Asociado a ello el valor del factor Cantidad también aparece limitante para los cultivos debido a que los suelos presentan valores que fluctúan entre  $0,07$  a  $2,4 \text{ mg Pk}^{-1}$  de suelo (Cuadro 2), siendo el valor crítico de  $3$  a  $4 \text{ mg Pk}^{-1}$  de suelo (Fardeau, 1997).

Paralelamente estos suelos presentan una alta capacidad buffer lo que indica la dificultad de modificar la fertilidad de los mismos debido a las altas dosis de P que se debieran aplicar para incrementar el P biodisponible. Cabe señalar además, que en general presentan bajos valores de  $\text{Ca}^{++}$  intercambiable (Mella y Kuhnes, 1985) constituyendo esto una deficiencia tan importante como la del P.

En el suelo Serie Crucero en tres condiciones de manejo es posible visualizar que los valores de  $C_p$  son extremadamente bajos, en especial en condición de manejo bajo pino, y con valores  $E_i$  también bajos, con un ligero incremento en el estado de barbecho producto de la mineralización de P bajo esta condición de manejo. Sin embargo, bajo este mismo sistema la capacidad buffer se incrementa, lo que está en estrecha relación con el modelo pluricompartimental (Fardeau, 1993). Al obtener la relación de radiactividad remanente respecto de la radiactividad inicial (Cuadro 2) se aprecia que a excepción del suelo Chanleufú y Ralún, la mayor parte de los suelos presentan valores de retención de P inferiores a  $0,15$  y con diferencias marcadas entre ellos. Por el contrario, cuando se determina la retención de P por el método de Blakemore (Sadzawka, 1990) no se aprecia una gran discriminación entre los suelos, indicando la mayor sensibilidad del método en estudio (Figura 1 y 2).

Cuadro 2. Cinética de intercambio isotópico en algunos suelos de la X Región de Chile

Table 2. Isotopic exchange kinetics in some soils of the X Region of Chile

Suelo Prof. 0-20 cm	$C_p$ mg P/L	$E_i$ mg P/kg s	$E_i/C_p$ 1/kg s	$r_i/R$	Retención P %	$K_m$ 1/min	$T_m$ min	$F_m$ mg P/kg min
Alerce	0,0013	0,31	240	0,0417	98	124	8,10 E-03	1,60
Frutillar	0,0020	2,40	1.176	0,0085	99	8.094	1,24 E-04	165
Antillanca	0,0015	0,17	115	0,0869	56	30	3,33 E-02	0,44
Chanleufú	0,0011	0,07	68	0,1473	75	13	7,69 E-02	0,14
Ralún	0,0017	0,11	63	0,1583	73	8	1,25 E-01	0,14
Corte Alto	0,0015	1,26	861	0,0116	96	1.101	9,08 E-04	16
Puerto Fonk	0,0018	0,95	530	0,0189	95	820	1,22 E-03	15
Puyehue	0,0020	0,67	331	0,0302	96	360	2,78 E-03	7
Crucero (barbecho)	0,0020	1,23	618	0,0162	93	2.081	4,81 E-04	41
Crucero (pino)	0,0016	0,34	217	0,0460	83	1.145	8,73 E-04	18
Crucero (trigo)	0,0018	0,21	121	0,0828	87	8	1,25 E+02	0,14
Fresia	0,0019	0,20	102	0,0978	90	13	7,69 E-02	0,25

$C_p$  = Factor Intensidad.

$E_i$  = Factor Cantidad.

$E_i/C_p$  = Factor Capacidad.

$r_i/R$  = Relación de radiactividad.

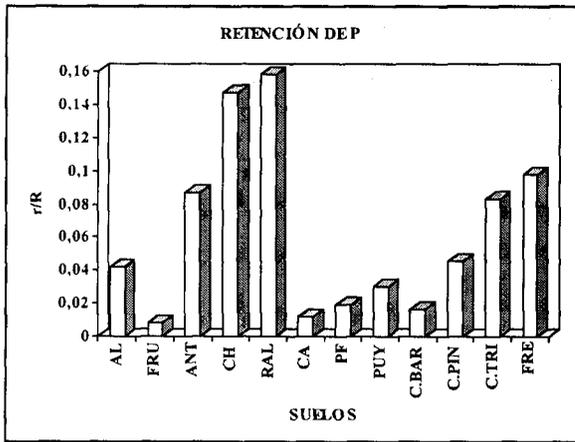


Figura 1. Retención de P determinada por intercambio isotópico.

Figure 1. P retention according to isotopic exchange.

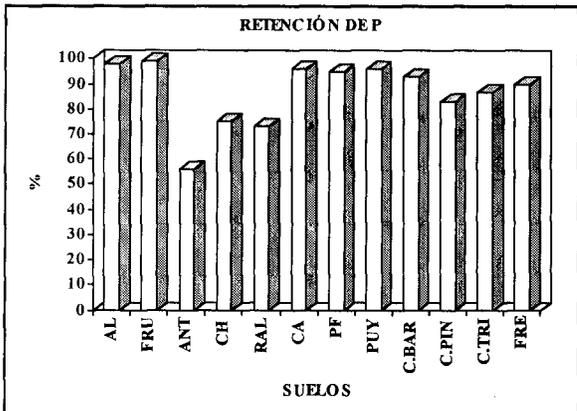


Figura 2. Retención de P determinada por el método de Blakemore.

Figure 2. P retention according to Blakemore method.

El pool  $E_1$  es el fosfato libre, que representa a los iones fosfato que pueden ser transferidos a la solución suelo en un tiempo menor a 15 segundos. Son directa e inmediatamente disponibles para el cultivo. La altura del pool  $E_1$  es proporcional a la concentración  $C_p$  (intensidad), la superficie del pool es proporcional a la cantidad  $E_1$  que es tomada como el factor Cantidad y el largo del pool  $E_1/C_p$ , el cual es proporcional a la capacidad de fijación del suelo, es el factor Capacidad. Cada vez que el P es absorbido por el cultivo los factores intensidad y cantidad decrecen y el factor capacidad incrementa.

En relación al modelo pluricompartimental, es posible observar la disponibilidad de P de acuerdo a cada uno de los pools establecidos (Cuadro 3) y su análisis gráfico para los tres sistemas de manejo en el suelo Serie Crucero (Figura 3). En el suelo Crucero bajo barbecho, el pool de P inmediatamente disponible es ligeramente más alto que en los otros dos sistemas de manejo, lo que implica una liberación de P de formas menos disponibles a más disponibles, y con una distribución relativamente homogénea en los pools o compartimentos A, B y C. Por otra parte, se observa que hay un incremento en el compartimento D que probablemente corresponde a P inmovilizado producto de anteriores aplicaciones de fertilizantes fosfatados. El suelo Crucero bajo pino (Figura 3), debido a que no ha sido fertilizado, muestra que la única fuente de P se encuentra en forma poco disponible en el compartimento D y que se irá agotando paulatinamente en el tiempo, de acuerdo a la absorción de P por las plantas.

En el suelo Crucero bajo trigo, la mayor parte del P se encuentra presente en el pool A producto de la reciente aplicación de fertilizante en la forma de superfosfato triple (SFT), puesto que al aplicar P al cultivo no más de un 2% (Fardeau, 1996, Fardeau *et al.*, 1996) es directamente utilizado por las plantas en el primer año de cultivo, y el remanente queda adsorbido por las partículas de suelo. Además, se ha observado (Fardeau *et al.*, 1995) que cuando el P se aplica en la forma de SFT este se moviliza rápidamente hacia los pools o compartimentos donde el P se encuentra más fácilmente disponible para las plantas, lo cual explica el alto valor de P que se encuentra para este suelo y bajo este sistema de manejo en el pool A y que representa el 89,5% del P total (Cuadro 1).

Finalmente, cabe señalar que a mayor relación R/r es más difícil incrementar el nivel de P extractable en bicarbonato, aún con altas dosis de fertilización fosfatada.

Cuadro 3. Pooles de cinética de intercambio ( $\text{mgPk}^{-1}$ ) en algunos suelos de la X Región de ChileTable 3. Pools from isotopic exchange kinetics ( $\text{mgPk}^{-1}$ ) in some soils of the X Region of Chile

Suelo Prof. 0-20 cm	Pool A 1 min-1 día	Pool B 1 día-3 meses	Pool C 3 meses-1 año	Pool D > 1 año
Alerce	23	260	227	820
Frutillar	79	458	285	981
Antillanca	16	154	92	168
Chanleufú	8	107	94	268
Ralún	38	471	149	108
Corte Alto	87	736	446	949
Puerto Fonk	46	364	269	968
Puyehue	32	253	180	612
Crucero (barbecho)	41	268	198	962
Crucero (pino)	5	24	19	950
Crucero (trigo)	1.211	141	0,25	0,02
Fresia	94	857	148	80

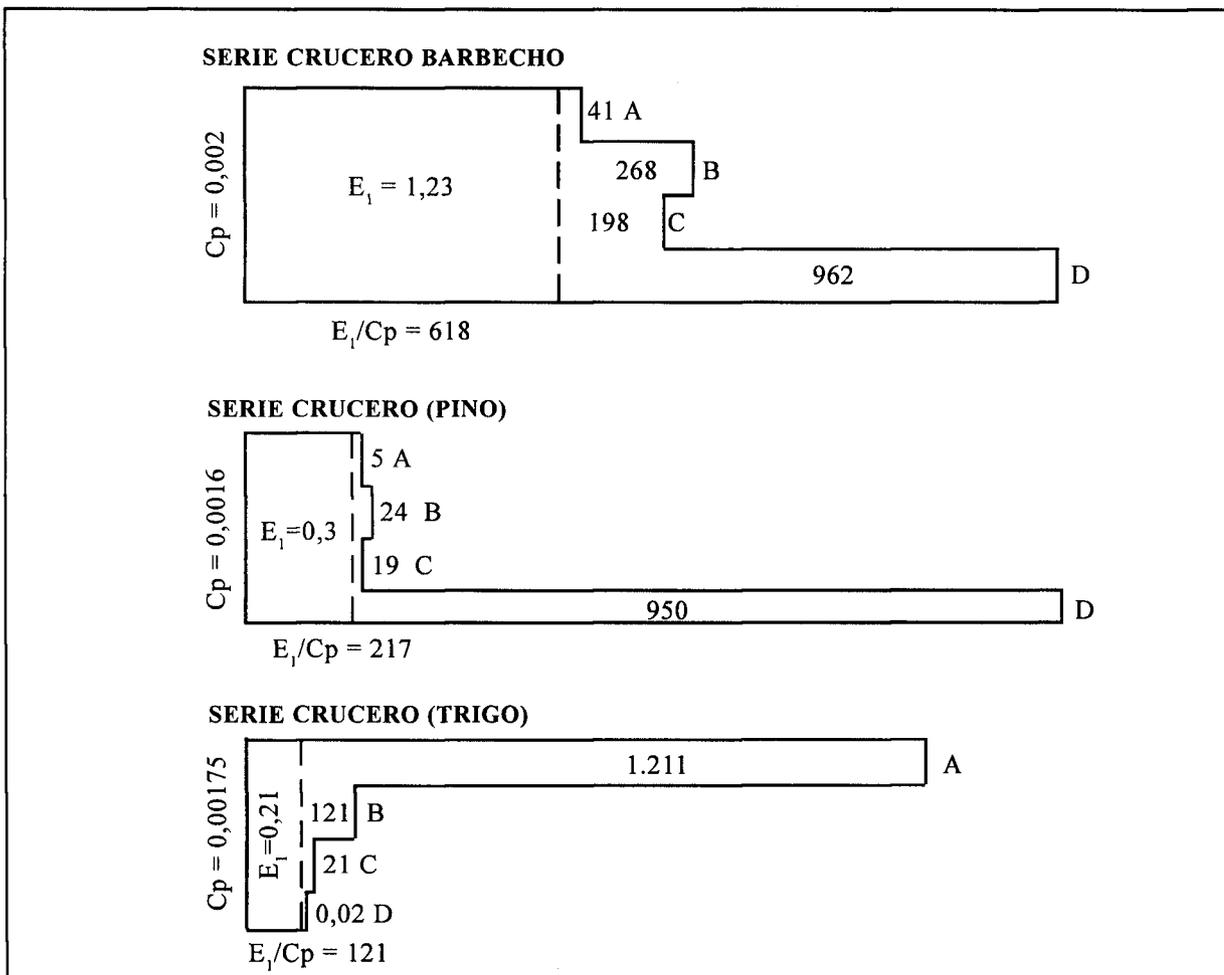


Figura 3. Análisis pluricompartimental del Suelo Serie Crucero bajo tres sistemas de manejo.

Figure 3. Pluricompartimental analysis of the Crucero Soil Series under three management systems.

## CONCLUSIONES

Una propiedad común en los suelos estudiados es su alta capacidad de retención de P con valores de  $r_i/R$  inferiores a 0,2. Una segunda propiedad en común es un valor de  $C_p$  inferior a  $0,02 \text{ mgL}^{-1}$ . Así, la nutrición fosfatada es un factor limitante para la producción de la mayoría de los cultivos, aun cuando la cantidad directamente disponible ( $E_i$ ) no es tan baja. De esta manera, cuando se aplica P, la mayor parte de éste quedará absorbido en las partículas de suelo llegando a ser menos disponible.

En el caso del P, la mayor dificultad es que al aplicarlo a un nivel económico razonable es difícil incrementar la cantidad de P biodisponible y el factor intensidad, permaneciendo constante la fertilidad del suelo.

El método utilizado permite caracterizar cinéticamente los suelos, de una manera rápida y precisa, a la vez que es posible inferir el P derivado del fertilizante en estudios de corta duración.

## RESUMEN

Se utilizó un modelo predictivo de cinética de intercambio isotópico a objeto de caracterizar los parámetros cinéticos y el modelo pluricompartimental de P biodisponible, en 10 suelos de la X Región del país.

Para ello, los suelos se agitaron hasta alcanzar el estado de equilibrio y luego se agregó una solución marcada con  $^{32}\text{P}$  libre de portador. El análisis se realizó a dos tiempos de muestreo, 1 y 10 minutos. La concentración de P en la solución suelo se determinó por colorimetría utilizando el método verde de malaquita y la radiactividad inicial y final se determinó por centelleo líquido, en un contador Beckman LS 5000. Se determinaron los factores Cantidad, Intensidad, Capacidad y los parámetros cinéticos  $F_m$ ,  $K_m$  y  $T_m$ , obteniéndose a su vez los valores del modelo pluricompartimental en los diferentes suelos. El factor Intensidad en todos los suelos estudiados fue inferior a  $0,02 \text{ mgPL}^{-1}$ , valor que se considera limitante para el crecimiento de los cultivos. Asociado a ello el valor del factor Cantidad también aparece limitante para los cultivos debido a que los suelos presentaron valores entre  $0,07$  a  $2,4 \text{ mgPk}^{-1}$  de suelo.

En el suelo Crucero, que fue estudiado en tres sistemas de manejo, bajo barbecho el pool de P inmediatamente disponible es ligeramente más alto que en los otros dos sistemas de manejo, y con una distribución relativamente homogénea en los pools A, B y C. Por otra parte, se observó que hay un incremento en el pool D que correspondería a P inmovilizado desde anteriores aplicaciones de fertilizantes. El suelo Crucero bajo pino muestra que la única fuente de P para las plantas se encuentra en forma poco disponible en el pool D y que se irá agotando paulatinamente en el tiempo, de acuerdo a la absorción de P por las plantas.

En el suelo Crucero bajo trigo, la mayor parte del P se encuentra presente en el pool A producto posiblemente de la reciente aplicación de fertilizante.

**Palabras claves:** P biodisponible, modelo predictivo, cinética de intercambio isotópico.

## LITERATURA CITADA

- CARRASCO, A. Y OPAZO, J. 1995. Predicción de parámetros de respuesta al P de las plantas en función de algunas propiedades químicas en suelos Ultisols y Andisols del Sur de Chile. *Agricultura Técnica (Chile)* 55 (3-4): 243-250.
- CHANG, S.C. AND JACKSON, M.L. 1956. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Science* 84: 133-144.
- FARDEAU, J.C. 1993. Le phosphore assimilable des sols: sa représentation par un modèle fonctionnel à plusieurs compartiments. *Agronomie* 13: 317-331.
- FARDEAU, J.C.; GUIRAUD, G. AND MAROL, C. 1995. Bioavailable soil P as a key to sustainable agriculture. *In: Proceedings of a symposium "Nuclear techniques in soil-plant studies for sustainable agriculture and environmental preservation"* IAEA. STI/PUB/947 pp. 131-144.
- FARDEAU, J.C. 1996. Dynamics of phosphate in soils. An isotopic outlook. *Fertilizer Research* 45: 91-100.
- FARDEAU, J.C.; GUIRAUD, G. AND MAROL, C. 1996. The role of isotopic techniques on the evaluation of the agronomic effectiveness of P fertilizers. *Fertilizer Research* 45: 101-109.
- FARDEAU, J.C. 1997. P-32 isotopic exchange kinetics. Experimental procedure, interpretation of results. Application to the prediction of the efficiency of P fertilizers. Working paper presented at the Third Research Coordination Meeting of the FAO/IAEA Coordinated Research Programmes. "The use of nuclear and related techniques for evaluating the agronomic effectiveness of phosphate fertilizers, in particular Rock Phosphate". Report D1-RC-542.3.
- FROSSARD, E.; STEWART, J. AND ARNAUD, R.J. 1989. Distribution and mobility of phosphorus in grassland and forest soils of Saskatchewan. *Can. J. Soil Science* 69: 401-416.
- FROSSARD, E.; FARDEAU, J.C.; BROSSARD, M. AND MOREL, J.L. 1994. Soil isotopically exchangeable phosphorus: a comparison between E and L values. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 846-851.
- HEDLEY, M.J.; STEWART, J.W. AND CHAUCAR, B. 1982. Changes in inorganic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 970-976.
- MELLA, A. Y KUHNE, A. 1985. Sistemática y descripción de las familias, asociaciones y series de suelos derivados de materiales piroclásticos de la zona central sur de Chile. *En: TOSO, J. (ed.). Suelos volcánicos de Chile.* Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Ministerio de Agricultura. Santiago. 1985. pp. 549-716.
- MOREL, C. AND PLENCHETTE, C. 1994. Is the isotopically exchangeable P of the plant available P in a loamy soil? *Plant Soil* 158: 287-297.
- NIREL, P.M. AND MOREL, F.M. 1990. Pitfalls of sequential extraction. *Wat. Res.* 24(8): 1055-1056.
- NOVOZAMSKY, I.; VAN DIJK, D.; LEE, J.J. AND HOUBA, V.J.G. 1993. Automated determination of trace amounts of phosphate in soil extracts using malachite green. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 24 (9&10): 1065-1077.
- SADZAWKA, M.A. 1990. Métodos de análisis de suelos. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) Est. Exp. La Platina. Santiago, Chile. Serie La Platina Nº 16. 130 p.
- SOIL SURVEY STAFF. 1996. Keys to Soil Taxonomy. 7<sup>th</sup> edition. Natural Resources Conservation Service. USDA. 644 p.