

ESTIMACIÓN DEL FÓSFORO NECESARIO PARA ALCANZAR NIVELES DE SUFICIENCIA EN SUELOS VOLCÁNICOS DEL SUR DE CHILE¹

Estimation of phosphorus needed for attaining sufficiency levels in volcanic soils from the south of Chile

María Adriana Carrasco R.^{2,3} y José Domingo Opazo A.^{2,3}

S U M M A R Y

The volcanic soils from the south of Chile, Andisols and Ultisols, receive high rates of phosphorus applied in bands in which a high P concentration appears. This P reacts with the solid phase of the soil and hence it is important to evaluate the available or labil P.

In this study, by means of a laboratory incubation experiment, the P availability was evaluated, the soil chemical properties that control it were identified, and equations to estimate the P rate needed for attaining a given P sufficiency level are proposed.

The incubation experiment involved eight soil samples taken in the VIII, IX and X Regions and was carried out in an incubator, for 15 days, at 25 °C, and at a relative humidity equivalent to 60-70% of the field capacity. The rates of P applied varied from 150 to 900 mg kg⁻¹ P. The available P was measured by the Olsen method (Olsen-P).

The equations obtained for estimating the Olsen-P (y) as a function of the P applied (x) are of the type $y = a + bx$. They show that the method of incubation is a reliable technique for determining the relation between Olsen-P and the applied P. The "a" constant was related to the k_2 , constant of the two-surface Langmuir equation ($a = -27.247 + 20.286k_2$) and "b" with the total extractable acidity (TEA) ($b = 0.4268 - 0.005433TEA$). The slope "b" was inversely related to the soil P retention capacity.

The P rates needed for a given sufficiency level (PRS) were estimated using the equation $PRS_{soil} = (\text{needed P} - \text{initial P})PRU_{soil}$, where PRU_{soil} is the quantity to increment the Olsen-P in one unit (mg kg⁻¹) and was calculated as $PRU_{soil} = (0.4268 - 0.005433TEA)^{-1}$. The estimated rates would be applicable to field conditions if it is considered that in the incubation experiment a situation similar to that in the fertilization bands occurs in sowings carried out with a combined seed and fertilizer drill.

Key words: P sufficiency level, phosphate soil incubation, P rates estimation, total extractable acidity, soils derived from volcanic ashes.

INTRODUCCIÓN

El fósforo, aplicado a los suelos como fertilizante para suplir los requerimientos de los cultivos, reacciona con la fase sólida quedando parte importante del P retenido en formas no disponibles; en consecuencia, la disponibilidad del fósforo aplicado dependerá de la capacidad de retención y desorción que presenten los suelos.

En los suelos de origen volcánico del sur de Chile, Andisoles y Ultisoles, el fósforo reacciona con el alofán, óxidos hidratados de hierro y aluminio y complejos de humus con hierro y aluminio, lo que implica que se presenten valores de retención del P aplicado superiores al 85% en los Andisoles y alrededor del 70% en los Ultisoles (Honorato, Galindo y Pinochet, 1984).

Hasta la fecha la solución práctica al problema ha sido la aplicación de altas dosis de fertilizantes fosfatados para lograr una productividad rentable en cultivos y praderas.

Una forma de mejorar la eficiencia del P fertilizante, es aplicarlo en bandas. Esto genera sitios en los cuales la concentración de P es muy alta, ya que se

¹Recepción de originales: 1 de septiembre de 1995.
Investigación financiada por FONDECYT, Proyecto N° 90/1292.
Los autores agradecen a los profesores Sr. Claudio Fernández L. y Sr. Alberto Mancilla M., de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad de Chile, su apoyo en la presentación matemática y estadística de los resultados.

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

³Correo electrónico: acarrasc@abello.dic.uchile.cl

reduce la superficie de reacción en la interfase suelo-fertilizante, alcanzándose de esta forma concentraciones en la solución suelo mil veces más altas, en comparación al suelo no fertilizado (Lindsay y Stephenson, 1959).

Mediante ensayos de incubación que involucran un tiempo de reacción del fosfato con el suelo, se puede conocer el comportamiento del suelo y relacionar éste con algunas propiedades químicas del suelo, más simples de medir, con el propósito de determinar las dosis de P requeridas para alcanzar un nivel de suficiencia.

En fertilidad de suelos, el nivel de suficiencia es un índice que permite la interpretación de los valores analíticos para la disponibilidad de nutrientes. Al respecto, Olson *et al.* (1987), citado por Cox (1994), señalan que la filosofía de interpretación de los valores analíticos que aplican la mayoría de los laboratorios universitarios de USA es la del nivel de suficiencia, contenido sobre el cual no es necesario fertilizar. Otro criterio común de manejo de la fertilidad del suelo, es que una vez alcanzado el nivel de suficiencia se aplica una dosis de mantención. Cox (1992), indica que la razón de usar el índice de suficiencia es que no existe un nivel crítico exacto, ya que se presenta un rango de valores críticos debido a las condiciones biológicas.

En Chile, el nivel de suficiencia para el P disponible (P-Olsen) para un amplio grupo de cultivos ha sido estimado en 16 mg kg⁻¹ de P. Rodríguez (1990), señala entre ellos el cultivo de trigo en Andisoles; para suelos aluviales de la zona central indica un

nivel de suficiencia de 12 mg kg⁻¹ de P y para el cultivo de la papa, señala uno de 25 mg kg⁻¹ de P.

Los objetivos del presente trabajo fueron: evaluar la disponibilidad de fósforo en suelos de origen volcánico incubados con fosfato, identificar las propiedades químicas que controlan el P disponible y proponer ecuaciones para estimar la dosis de P necesaria para alcanzar un nivel de suficiencia en el suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Suelos. Se tomaron muestras de cuatro Andisoles y cuatro Ultisoles entre las regiones VIII y X, cuyas propiedades químicas y parámetros de retención de fósforo, descritos por Carrasco y Opazo (1995), se presentan en los cuadros 1 y 2, respectivamente.

Ensayo de incubación con P. Los suelos se incubaron por 15 días, en una estufa de incubación, con distintas dosis de fósforo: 0, 150, 300, 450, 600 y 900 mg kg⁻¹ de fósforo, a una humedad equivalente al 60 - 70% de la capacidad de campo y a 25 °C. Completados los 15 días de incubación se analizó el P disponible por el método de Olsen (Page, Miller y Keeney, 1982).

Análisis estadístico. Se hizo un análisis de regresión lineal entre el P disponible después de la incubación y el P aplicado. Mediante análisis de regresión múltiple, paso a paso se buscaron ecuaciones que permitieran estimar las constantes de las ecuaciones resultantes en función de algunas propiedades químicas relacionadas con la retención de P.

CUADRO 1. Algunas propiedades químicas de los suelos en estudio

TABLE 1. Some chemical properties of the soils studied

Suelo	pH (1:25)		Materia orgánica %	Acidez ¹ total -----cmol(+) kg ⁻¹ -----	Al KCl 1 N kg ⁻¹	P Olsen mg kg ⁻¹	Al oxal. ác. %	Si oxal. ác. %	Retención de P (Saunders) mg kg ⁻¹
	H ₂ O	KCl 1N							
Andisoles									
Sta. Bárbara	5,1	4,4	8,6	33,3	1,6	8,3	1,28	0,11	5.190
Victoria	5,4	4,5	9,5	36,2	0,7	13,4	1,34	0,14	5.097
Puerto Octay	5,6	5,1	20,2	52,8	0,2	5,8	5,43	1,87	7.219
Corte Alto	5,2	4,6	18,4	43,0	0,5	35,3	1,59	0,26	5.597
Ultisoles									
Collipulli	5,1	4,3	6,3	29,5	1,4	10,0	0,63	0,06	3.705
Metrenco	5,2	4,3	6,0	23,6	1,2	11,9	0,63	0,06	3.478
Cudico	5,6	4,6	8,2	30,4	0,3	5,7	0,59	0,09	3.858
Fresia	5,1	4,3	8,5	28,0	1,3	12,8	0,63	0,09	3.566

¹Acidez total medida por el método del BaCl₂-TEA a pH 8,2 (Page, 1982).

CUADRO 2. Parámetros de retención de fósforo para la ecuación de Langmuir de doble superficie

TABLE 2. Phosphorus retention parameters for the two-surface Langmuir equation

Suelo	Parámetros Langmuir doble superficie ¹			
	k_1 L mmol ⁻¹	b_1 mmol kg ⁻¹	k_2 L mmol ⁻¹	b_2 mmol kg ⁻¹
Andisoles				
Sta. Bárbara	117	51,1	0,448	168
Victoria	93	41,7	0,854	137
Puerto Octay	126	84,1	1,099	254
Corte Alto	63	38,9	0,866	153
Ultisoles				
Collipulli	109	28,3	0,684	89
Metrenco	29	37,4	0,248	95
Cudico	82	30,8	0,417	103
Fresia	50	31,6	0,222	108

¹ k_1 y k_2 = Constantes relacionadas con las energías de enlace de las superficies de alta y baja energía, respectivamente. b_1 y b_2 = máximos de adsorción de las superficies de alta y baja energía, respectivamente.

RESULTADOS

Los valores de P-Olsen para cada una de las dosis de P aplicada a los cuatro Andisoles y cuatro Ultisoles, corregidos por el P-Olsen inicial del suelo, se muestran en las figuras 1a y 1b, respectivamente. Se observa que la disponibilidad de P aumenta linealmente en la medida que la dosis de P se incrementa, sin alcanzar un valor máximo, corroborando así la alta capacidad de retención de P de los suelos estudiados. Además, se puede apreciar que los Andisoles muestran una mayor variabilidad en su comportamiento que los Ultisoles.

La relación lineal observada entre la disponibilidad de P y la dosis de P aplicado permitió estimar el requerimiento de P para alcanzar un nivel dado de P-Olsen utilizando ecuaciones del tipo:

$$y = a + bx \quad (\text{Ec. 1})$$

donde:

- y = P-Olsen (mg kg⁻¹) después de la incubación.
- x = dosis de P aplicado (mg kg⁻¹).
- a y b = constantes correspondientes al intercepto y a la pendiente de la recta, respectivamente.

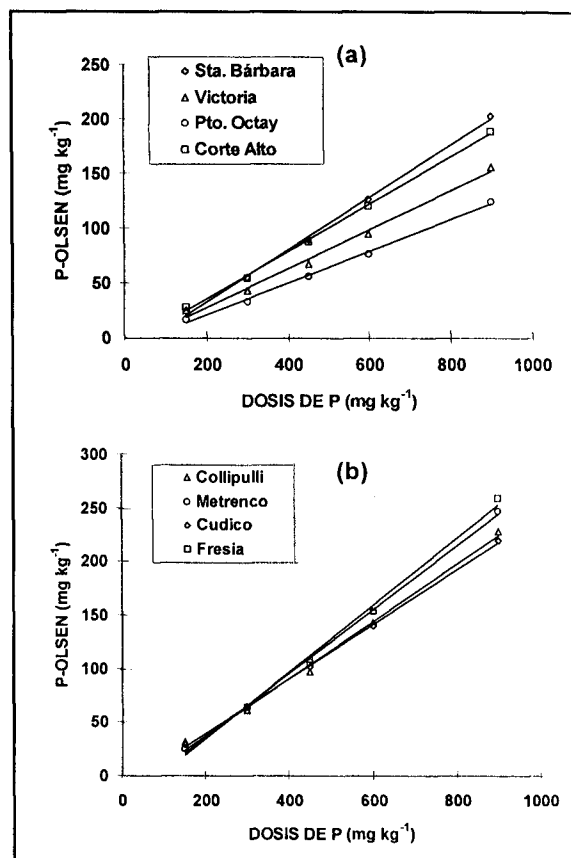


FIGURA 1. Contenido de P-Olsen en los suelos Andisoles (a) y Ultisoles (b) incubados con distintas dosis de P.

FIGURE 1. Olsen-P content in Andisols (a) and Ultisols (b) incubated with different P quantities.

En el Cuadro 3 se muestran los valores de las constantes de las ecuaciones de regresión obtenidas para los distintos suelos, junto a los coeficientes de correlación, todos mayores que 0,99. En general, ambas constantes son menores en los Andisoles.

La pendiente de las ecuaciones de regresión ("b") fluctuó entre 0,15 y 0,24 en los Andisoles, y entre 0,26 y 0,31 en los Ultisoles (Cuadro 3). Considerando que a un valor menor de "b" se asocia una mayor capacidad de retención de P, los resultados de esta investigación corroboran que los Andisoles tienen una mayor capacidad de retención de P en comparación con los Ultisoles; esto también ha sido señalado por Honorato, Galindo y Pinochet (1984), y Honorato y Pinochet (1986).

Los suelos de las series Santa Bárbara y Victoria (Andisoles), tienen un valor de "b" un 10% menor que el de los suelos de las series Collipulli y Cudico (Ultisoles) lo cual indica que algunos Andisoles, más evolucionados, se comportarían en forma similar

a los Ultisoles en cuanto a su capacidad de retención de P. De hecho, Aomine (1971), encontró que los Andisoles ubicados al norte del paralelo 38° Lat S, como es el caso de los suelos mencionados, presentan un mayor grado de evolución que los Andisoles ubicados al sur de dicho paralelo y, por lo tanto, algunas de sus propiedades químicas serían más similares a las de los Ultisoles, como también se observa en el Cuadro 1, para pH, materia orgánica y acidez total.

El valor de "b" para el suelo de la serie Puerto Octay es aproximadamente un 50% del valor de los Ultisoles (Cuadro 3), relación que también se observa con respecto de la capacidad de retención de P medida por el método de Saunders (Cuadro 1). Esto indica que el método de Saunders, al expresar los resultados en mg kg⁻¹ de P en lugar de porcentaje del P retirado de la solución, también sería un buen predictor para discriminar la capacidad de retención de P y, podría usarse como un índice para la interpretación de las dosis de P en una fertilización de tipo correctivo.

Para determinar si las constantes "a" y "b" eran dependientes de las propiedades químicas medidas, se hizo un análisis de regresión múltiple paso a paso, el cual indicó que "a" era dependiente de la constante k₂ de la ecuación de la isoterma de Langmuir de doble superficie y "b" era dependiente de la acidez total extraíble (ATE), de acuerdo a las ecuaciones:

CUADRO 3. Constantes de las ecuaciones de regresión del tipo y = a + bx para el P-Olsen en suelos incubados con distintas dosis de P

TABLE 3. Constants for the regression equations of the type y = a + bx for Olsen-P in soils incubated with different quantities of P

Suelo	Constantes		Coeficiente de correlación r
	a	b	
Andisoles			
Sta. Bárbara	-15,4	0,24	0,998** ¹
Victoria	-8,1	0,22	0,989**
Puerto Octay	-8,5	0,15	0,995**
Corte Alto	-7,9	0,18	0,998**
Ultisoles			
Collipulli	-15,7	0,27	0,993**
Metrengo	-23,9	0,30	0,999**
Cudico	-12,0	0,26	0,999**
Fresia	-28,4	0,31	0,993**

¹Nivel de significancia P ≤ 0,01.

$$a = -27,247 + 20,286 k_2 \quad (\text{Ec. 2})$$

$$R^2_{aj.} = 0,677 \quad (P \leq 0,05)$$

$$b = 0,4268 - 0,005438 \text{ ATE} \quad (\text{Ec. 3})$$

$$R^2_{aj.} = 0,790 \quad (P \leq 0,01)$$

La constante k₂, es la constante de afinidad de la superficie de menor energía, de la cual se estaría liberando el P aplicado como fertilizante. Bustos (1992), al estudiar la capacidad de retención de P en suelos de las regiones VIII a X, encontró que k₂ se correlaciona significativamente (P ≤ 0,01) con la acidez total extraíble, el Al y Si activos y el Al hidroxilado (extraíble a pH 4,8), lo cual indica que estas propiedades químicas estarían relacionadas con la retención de P en la superficie de menor energía, y, por lo tanto, regularían la disponibilidad del P aplicado.

La inclusión de la acidez total extraíble en la ecuación de regresión para "b", Ec. (3) indica que a mayor acidez total extraíble la pendiente "b" disminuye y, por lo tanto, la capacidad de retención de P del suelo aumenta. Lo anterior se explica si se considera que una característica de los Andisoles es tener una alta acidez total extraíble, la que no solo es función de la materia orgánica sino también del contenido y tipo de arcilla. Carrasco y Sadzawka (1985), encontraron que al desplazarse hacia el sur del paralelo 38° Lat S, al aumentar los contenidos de materia orgánica y de materiales amorfos en los Andisoles, la acidez total extraíble del suelo es más alta.

Carrasco *et al.* (1994) al estudiar la retención de P en doce Andisoles del sur de Chile, encontraron que la capacidad de retención de P medida por el método de Saunders y expresada en mg kg⁻¹ de P, daba un coeficiente de correlación (r) de 0,837 (P ≤ 0,01) con la acidez total extraíble. Al analizar los datos del Cuadro 1 para estas mismas propiedades se obtiene un r = 0,965 corroborando la dependencia de la retención de P de la acidez total extraíble del suelo.

Mediante las ecuaciones 2 y 3 se calcularon las constantes "a" y "b" en función de k₂ y de la acidez total extraíble (ATE), respectivamente, obteniéndose una predicción aceptable de las constantes, especialmente para "b", según lo muestran las figuras 2 y 3. Dada la similitud de los valores de las constantes se reemplazó "a" y "b" en la Ecuación 1 por las ecuaciones 2 y 3 obteniéndose la ecuación:

$$y = -27,247 + 20,286 k_2 + 0,4268x - 0,005438 \text{ ATE}x \quad (\text{Ec. 4})$$

donde x e y tienen el mismo significado que en la Ecuación 1.

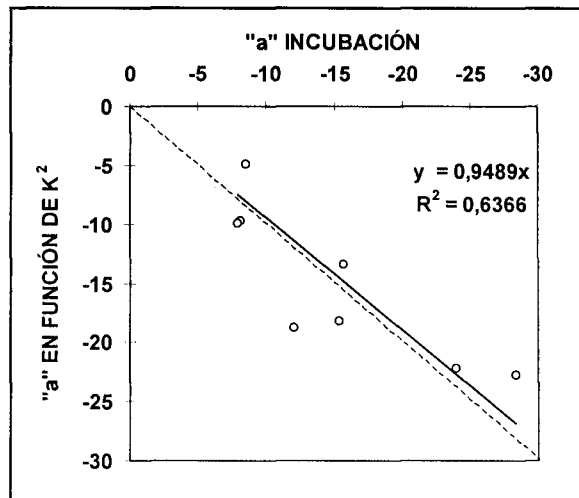


FIGURA 2. Comparación de los valores de la constante "a" calculados usando los datos de incubación y en función de k_2 .

FIGURE 2. Comparison of the of "a" constant values calculated from incubation data and as a function of k_2 .

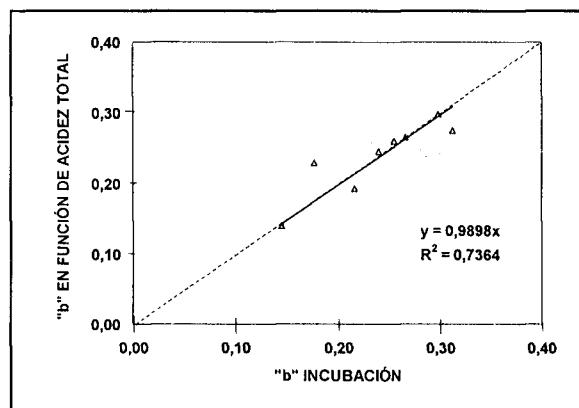


FIGURA 3. Comparación de los valores de la constante "b" calculados en función de los datos de incubación y en función de la acidez total extraíble.

FIGURE 3. Comparison of the "b"-constant values calculated from incubation data and as a function of the total extractable acidity.

Para alcanzar un nivel dado de P-Olsen, la dosis de P requerida se puede estimar mediante la Ecuación 1, usando los valores de "a" y "b" resultantes del ensayo de incubación (Cuadro 3). Sin embargo, como los suelos tienen un nivel inicial de P-Olsen se debe conocer además la dosis de P para incrementar el P-Olsen en un mg kg^{-1} ($\text{DPU}_{\text{suelo}}$) y así poder estimar la dosis de P requerida para alcanzar un nivel de suficiencia dado.

Si se considera la diferencia entre dos niveles de P-Olsen (y_1 e y_2) correspondientes a dos dosis de P (x_1 y x_2), se tiene:

$$(y_2 - y_1) = b (x_2 - x_1) \quad (\text{Ec. 5})$$

Si $(y_2 - y_1) = 1$, $(x_2 - x_1)$ corresponde a la $\text{DPU}_{\text{suelo, incubación}}$ y

$$\text{DPU}_{\text{suelo, incubación}} = b^{-1} \quad (\text{Ec. 6})$$

Si se hace el mismo análisis en función de la Ecuación 4 se obtiene:

$$(y_2 - y_1) = (0,4268 - 0,005438 \text{ ATE}) (x_2 - x_1) \quad (\text{Ec. 7})$$

Si $(y_2 - y_1) = 1$, $(x_2 - x_1)$ corresponde a la $\text{DPU}_{\text{suelo, ATE}}$ y

$$\text{DPU}_{\text{suelo, ATE}} = (0,4268 - 0,005438 \text{ ATE})^{-1} \quad (\text{Ec. 8})$$

La Ecuación 8 presenta la ventaja que la $\text{DPU}_{\text{suelo}}$ se puede determinar sólo en función de la acidez total extraíble lo cual hace innecesario medir la constante k_2 . Los resultados para la $\text{DPU}_{\text{suelo}}$ según las ecuaciones 6 y 8 se indican en el Cuadro 4, obteniéndose que la $\text{DPU}_{\text{suelo, incubación}} = 0,9665 \text{ DPU}_{\text{suelo, ATE}}$ ($R^2 = 0,8211$), es decir, habría una sobreestimación sólo del 3,4%, la que es muy aceptable.

Las dosis de P para alcanzar un P-Olsen de suficiencia específico en un suelo dado ($(\text{DPS})_{\text{suelo}}$) se calculan usando las ecuaciones:

$$(\text{DPS})_{\text{suelo, incubación}} = \frac{(\text{P-Olsen deseado} - \text{P-Olsen inicial})}{\text{DPU}_{\text{suelo, incubación}}} \quad (\text{Ec. 9})$$

$$(\text{DPS})_{\text{suelo, ATE}} = \frac{(\text{P-Olsen deseado} - \text{P-Olsen inicial})}{\text{DPU}_{\text{suelo, ATE}}} \quad (\text{Ec. 10})$$

Las dosis calculadas para llevar los suelos a un nivel de suficiencia de P-Olsen de 16 mg kg^{-1} usando las ecuaciones 9 y 10 muestran una muy buena coincidencia como se observa en la Figura 4, donde $(\text{DPS})_{\text{suelo, ATE}} = 1,0102 (\text{DPS})_{\text{suelo, incubación}}$ ($R^2 = 0,9928$), es decir, hay una sobrestimación sólo del 1%. Esto lleva a concluir que las dosis estimadas de P para llevar a un nivel de suficiencia determinado, en función de la acidez total extraíble, sería una aproximación teórica muy aceptable.

Las dosis, expresadas en kg ha^{-1} de P y kg ha^{-1} de P_2O_5 , para alcanzar un nivel de suficiencia de P de 16 mg kg^{-1} ($\text{DPS}_{\text{suelo}} - 16$), calculadas en función de la DPU_{ATE} se muestran en el Cuadro 4; éstas resultaron similares a las señaladas por Rodríguez (1993) para el cultivo del trigo en los Andisoles y Ultisoles.

Dado que los resultados de este estudio se obtuvieron en ensayos hechos en laboratorio, el uso de la acidez total extraíble como predictor de la dosis de P necesaria para alcanzar un nivel de suficiencia, debería ser validado en condiciones de campo, y de esta manera implementar el uso de la ATE como un índice para determinar la dosis de P en Andisoles y Ultisoles.

CUADRO 4. P-Olsen inicial y dosis de P para incrementar el P-Olsen en un mg kg^{-1} para llevar a un nivel de suficiencia de 16 mg kg^{-1} en los suelos estudiados

TABLE 4. Initial Olsen-P and P rates to increase the Olsen-P in one unit mg kg^{-1} and to attain a sufficiency level of 16 mg kg^{-1} in the soils under study

Serie	P-Olsen inicial	DPU _{suelo, incubación} mg kg^{-1} de P	DPU _{suelo, ATE}	DPS-16 según ATE ¹	
				kg ha^{-1} de P	kg ha^{-1} de P_2O_5
Sta. Bárbara	8,3	4,17	4,07	63	144
Victoria	13,4	5,65	4,35	23	52
Pto. Octay	5,8	6,90	7,16	146	334
Collipulli	10,0	3,76	3,75	45	103
Metrengo	11,9	3,36	3,35	27	63
Cudico	5,7	3,92	3,82	79	180
Fresia	12,8	3,21	3,64	23	53

¹ATE: Acidez total extraíble.

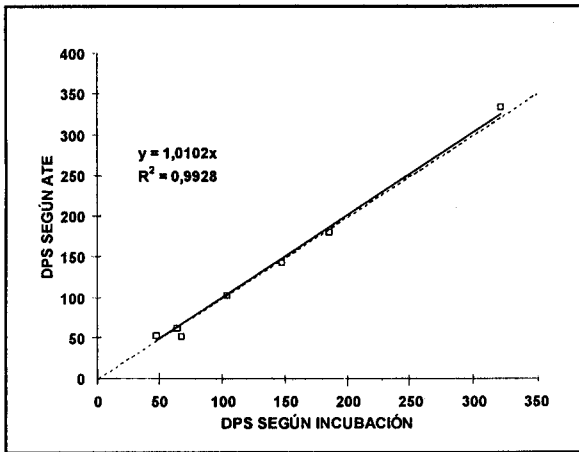


FIGURA 4. Comparación de las dosis de P, calculadas en función de los datos de incubación y en función de la acidez extraíble total, para alcanzar un P-Olsen de 16 mg kg^{-1} en los suelos estudiados.

FIGURE 4. Comparison of the P rates calculated as a function of the incubation data and as function of the total extractable acidity, to attain an Olsen-P of 16 mg kg^{-1} in the soils under study.

CONCLUSIONES

La presente investigación, lleva a concluir que es posible estimar las dosis de P para un nivel dado de suficiencia en función de la acidez total extraíble en los Andisoles y Ultisoles

El método de incubación empleado permitió obtener una buena relación del tipo $y = a + bx$, entre el P-disponible (P-Olsen) y la dosis de P aplicada. La pendiente "b" permitiría discriminar la capacidad de retención de P de los suelos y estimar la dosis de P para incrementar el P-Olsen en una unidad (mg kg^{-1}) ($\text{DPU}_{\text{suelo}}$), como $\text{DPU}_{\text{suelo}} = b^{-1}$ y así poder estimar las dosis necesarias para llevar los suelos a un nivel dado de suficiencia ($\text{DPS}_{\text{suelo}}$), considerando el P-Olsen inicial.

La significativa relación entre "b" y la acidez total permitió estimar la $\text{DPU}_{\text{suelo}}$ como $\text{DPU}_{\text{suelo, ATE}} = (0,4268 - 0,005438 \text{ ATE})^{-1}$ y la $\text{DPS}_{\text{suelo}}$ como $(\text{DPS})_{\text{suelo, ATE}} = (\text{P-Olsen deseado} - \text{P-Olsen inicial}) \times \text{DPU}_{\text{suelo, ATE}}$, proporcionando así una herramienta más para la determinación de la fertilización fosfatada en los Andisoles y Ultisoles.

Las dosis estimadas en función de la acidez total extraíble serían aplicables en condiciones de campo, en Andisoles y Ultisoles, si se considera que durante la incubación se simula lo que ocurre en la banda de fertilización en siembras realizadas con máquina sembradora-abonadora.

RESUMEN

Los suelos derivados de cenizas volcánicas, Andisoles y Ultisoles, del sur de Chile reciben altas dosis de P en forma de bandas, en las cuales se produce una elevada concentración de P. Este P reacciona con la fase sólida del suelo, siendo importante evaluar el P disponible o lábil.

En este estudio, mediante un ensayo de incubación en laboratorio, se evaluó la disponibilidad de P, se identificaron las propiedades químicas del suelo que la controlan y se proponen ecuaciones para estimar la dosis de P necesaria para alcanzar un nivel dado de suficiencia de P.

El ensayo de incubación consideró ocho muestras de suelo tomadas en las regiones VIII, IX y X, y se hizo en una estufa incubadora, por 15 días, a 25 °C, y una humedad equivalente al 60-70% de la capacidad de campo. Las dosis de P aplicadas fluctuaron entre 150 y 900 mg kg⁻¹ de P. El P disponible se midió por el método de Olsen (P-Olsen).

Las ecuaciones resultantes para estimar el P-Olsen (y) en función del P agregado (x), son del tipo $y = a + bx$. Ellas indican que el método de incubación es una buena técnica para determinar la relación entre el P-Olsen y el P aplicado. La constante "a" se relacionó con la constante k_2 de la ecuación de Langmuir

de doble superficie ($a = -27,247 + 20,286k_2$) y "b" con la acidez total extraíble (ATE) ($b = 0,4268 - 0,005433ATE$). La pendiente "b" se relacionó inversamente con la capacidad de retención de P del suelo.

La dosis de P requerida para un nivel dado de suficiencia (DPS_{suelo}) se calculó con la ecuación $DPS_{suelo} = (P-Olsen\ deseado - P-Olsen\ inicial) DPU_{suelo}$, donde DPU_{suelo} es la dosis para incrementar el P-Olsen en un mg kg⁻¹, y se calculó como $DPU_{suelo} = b^{-1}$ y $DPU_{suelo} = (0,4268 - 0,005433ATE)^{-1}$.

Las dosis de P requeridas para un nivel dado de suficiencia de P (DPS_{suelo}) se estimaron con la ecuación $(DPS)_{suelo} = (P-Olsen\ deseado - P-Olsen\ inicial) DPU_{suelo}$, donde DPU_{suelo} es la dosis para incrementar en una unidad el P-Olsen (mg kg⁻¹) y se calculó como $DPU_{suelo} = (0,4268 - 0,005433ATE)^{-1}$. Las dosis estimadas serían aplicables a campo si se considera que en la incubación se simula lo que ocurre en la banda de fertilización en siembras realizadas con máquina sembradora-abonadora.

Palabras claves: nivel de suficiencia de P, incubación de suelos con fosfato, estimación de dosis de P, acidez total extraíble, suelos derivados de cenizas volcánicas.

LITERATURA CITADA

- AOMINE, S. 1971. Estudios adicionales de los suelos derivados de cenizas volcánicas. Proyecto de Reconocimiento e Investigación de los Suelos Chilenos. PNUD/FE/113/CHI/AGL.
- BUSTOS, J. 1992. Capacidad de retención y liberación de fósforo en suelos de origen volcánico. Memoria Ing. Agr. Santiago, Chile, Universidad de Chile, Fac. de Ciencias Agrarias y Forestales. 96 p.
- CARRASCO, M.A., OPAZO, J.D., BUSTOS, J. and TAPIA, X. 1994. Phosphorus sorption in volcanic ash soils from the south of Chile. I. Applicability of isotherms. Transactions 15th World Congress of Soil Science, Acapulco, México. Vol 3b Commission II: Poster Sessions. p.: 99-100.
- CARRASCO, M.A. y OPAZO, J.D. 1995. Predicción de parámetros de respuesta de las plantas al fósforo en función de algunas propiedades químicas en suelos Ultisoles y Andisoles del sur de Chile. Agricultura Técnica 55 (3-4): 245-250.
- CARRASCO, M.A. y SADZAWKA, M.A. 1985. Intercambio iónico. En: Tosso, J. (ed.). Suelos volcánicos de Chile. Ministerio de Agricultura, Instituto de Investigaciones Agropecuarias. p.: 349-372.
- COX, F.R. 1992. Range in soil phosphorus critical levels with time. Soil Sci. Soc. Am J. 56: 1.504-1.509.
- COX, F.R. 1994. Current phosphorus availability indices: characteristics and shortcomings. p. 101-113. In: Havling, J.L. and Jacobsen, J.S. (co-ed). Soil testing: prospects for improving nutrients recommendations. SSA, Inc.; ASA, Inc. Madison, Wisconsin, USA. Special Publication Nº 40, 220 p.
- HONORATO, R., GALINDO, G. y PINOCHET, D. 1984. Aplicación de algunos indicadores de propiedades ándicas en suelos chilenos derivados de materiales volcánicos. Ciencia e Investigación. Agraria 11 (3): 179-190.
- HONORATO, R. y PINOCHET, D. 1986. Clasificación de suelos chilenos derivados de materiales volcánicos utilizando los indicadores propuestos por ICOMAND. Ciencia e Investigación. Agraria 13 (2): 121-133.
- LINDSAY, W.L. and STEPHENSON, H.F. 1959. Nature of the reactions of monocalcium phosphate monohydrate in soils. I. The solution that reacts with the soil. Soil Sci. Soc. of Am. Proc. 23: 12-18.

PAGE, A.L., MILLER, M.H. and KEENEY, D.R. (ed.). 1982. Methods of soil analysis, Part 2. Chemical and microbiological properties. 2nd ed. Agronomy 9, ASA. SSSA, Madison, Wisconsin, USA. 1.159 p.

RODRÍGUEZ, JOSÉ. 1990. La fertilización de los cultivos. Un método racional. Facultad de Agronomía, Pontificia Universidad Católica de Chile. Colección en Agricultura. 406 p.

RODRÍGUEZ, JOSÉ. 1993. Manual de fertilización. Facultad de Agronomía, Pontificia Universidad Católica de Chile. Colección en Agricultura. 362 p.