

VARIACIÓN DE LA CAPACIDAD TAMPÓN EN SUELOS DERIVADOS DE CENIZAS VOLCÁNICAS

Variation of the buffer capacity in soils derived from volcanic ashes

Dante Pinochet T.¹, Fernando Ramírez R.^{1*} y Domingo Suárez F.¹

ABSTRACT

To evaluate the variation of the same type of soils to liming, a study was carried out in selected soil samples from soils derived from volcanic ashes. The parameters evaluated were the variation of initial pH (4.76 to 5.03), the initial content of exchangeable bases (2.3 to 8.3 $\text{cmol}_+ \text{kg}^{-1}$) and organic matter content (11.6 to 26.8 $\text{g } 100 \text{ g}^{-1}$). The initial pH level and organic matter affected the soil acidity parameters evaluated (buffering capacity, exchangeable Ca and exchangeable Al content). For agronomic purposes, it was established that for each gram of CaCO_3 applied to a kilogram of soil, the pH is increased 0.2 units, exchangeable Ca content increased 70%, and the exchangeable Al content decreased to 50% of its previous value, and there is a pH buffering capacity and exchangeable Ca content in the evaluated soils dependent on its organic matter content.

Key words: acid soil, Al exchangeable, exchangeable bases.

RESUMEN

Con el objetivo de evaluar la variación de un mismo tipo de suelo a la adición de cal, se realizó un estudio en muestras seleccionadas de suelos derivados de cenizas volcánicas. Los parámetros evaluados fueron: variación del pH inicial (4,76 a 5,03), contenido inicial de bases de intercambio (2,3 a 8,3 $\text{cmol}_+ \text{kg}^{-1}$) y el contenido de materia orgánica (11,6 a 26,8 $\text{g } 100 \text{ g}^{-1}$). El nivel inicial de pH y materia orgánica afectaron los parámetros de acidez del suelo evaluados (capacidad tampón, Ca intercambiable y contenido de Al intercambiable). Para propósitos agronómicos, se determinó que por cada gramo de CaCO_3 aplicado por kilogramo de suelo, el pH aumentó 0,2 unidades, el contenido de Ca intercambiable aumentó en un 70% y el contenido de Al intercambiable disminuyó en un 50% de su valor previo, y que existe una variación de la capacidad tampón de pH y del contenido de Ca intercambiable en los suelos dependiendo del contenido de materia orgánica.

Palabras clave: suelos ácidos, Al intercambiable, bases de intercambio.

¹ Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias, Casilla 567, Valdivia, Chile.
E-mail: fernandoramirez@uach.cl *Autor para correspondencia.
Recibido: 21 de enero de 2004. Aceptado: 3 de mayo de 2004.

INTRODUCCIÓN

La capacidad tampón (CT) de pH del suelo es la cantidad de ácido o base necesaria para modificar una unidad de pH (Rowell, 1994) y se estima como el recíproco de la pendiente de la curva de titulación con ácido o base (Rowell, 1994). Mientras mayor es la CT de un suelo mayor es la necesidad de base o ácido para variar el valor de pH. La CT no es igual entre los distintos tipos de suelos e incluso dentro del mismo tipo de suelo (Suárez y Márquez, 1992). Dentro de las razones que se han establecido para la variación de la CT están el material parental, el contenido y tipo de arcilla, el contenido de materia orgánica (MO) y la presencia de óxidos e hidróxidos de Fe y Al (Fassbender, 1987). Esta variación depende de las relaciones entre las fracciones lábiles que mantienen constante la concentración de hidrógeno (H^+) en la solución del suelo. La concentración de H^+ en la solución es estimada a través de mediciones de la acidez activa o pH, las fracciones lábiles son estimadas a través de la medición de la acidez potencial del suelo, donde se incluyen la acidez intercambiable y la acidez residual. La acidez intercambiable, a su vez, está relacionada al complejo de intercambio, dominado por la adsorción electrostática, expresada en los sitios de intercambio catiónico presentes en un suelo. La acidez residual corresponde a la acidez generada por la disociación de H^+ desde los grupos carboxilos, hidroxilos y aminos presentes en la MO y por la disociación desde los óxidos hidratados de Fe y Al (Rowell, 1994; Marschner, 1995). El equilibrio entre las fracciones lábiles y en solución implica que no habrá cambio en el pH del suelo hasta agotar la reserva de H^+ (Tan, 1993).

Para los suelos de origen volcánico, dominantes en la zona sur de Chile, se ha establecido que la CT varía entre 4,0 y 9,3 g $CaCO_3$ kg^{-1} de suelo pH^{-1} (Suárez y Márquez, 1992). Como primera aproximación para las necesidades de encalado (NC) se utilizan valores modales de la CT de acuerdo al origen del suelo (Rodríguez *et al.*, 2001). Para mejorar esta predicción en las necesidades de encalado se enfrenta el problema

de conocer el valor específico de la CT. Ello puede ser determinado por un análisis específico para cada suelo (FAO, 1970), pero implica un costo adicional y en la mayoría de los casos no se realiza.

Los factores que hacen variar la CT del suelo están relacionados con la acidez intercambiable. De esta forma, se ha indicado que la CT se relaciona con la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo (Halvin *et al.*, 1999), que sería un parámetro integral entre su mineralogía, contenido de arcilla y cantidad de MO. Suelos arcillosos y ricos en MO, con una alta CIC, tienen mayor CT, necesitando gran cantidad de $CaCO_3$ para neutralizar la acidez (Halvin *et al.*, 1999; Brady y Weil, 1999). En cambio, suelos arenosos que poseen una baja CIC, tienen baja CT, y cuando son ácidos requieren pequeñas adiciones de $CaCO_3$ para neutralizar su acidez (Honorato, 2000). A su vez, Fassbender (1987) señala que suelos con carga variable, cuya CIC se debe a las cargas generadas en la MO, poseen una alta CT. De esta forma, se ha observado que suelos con altos valores de MO, sesquióxidos y alofán tienen mayor poder tampón, el cual sería de acción rápida y reversible, y en suelos dominados por silicatos, óxidos e hidróxidos, la acción tampón es lenta y mayoritariamente irreversible (Fassbender, 1987).

El valor de pH al cual un suelo debe ser neutralizado, es el valor de pH que favorece las mejores condiciones de desarrollo para las plantas. Sin embargo, la acidez del suelo por sí misma (concentración de H^+) es rara vez fitotóxica en los suelos, sino más bien representa la concentración de Al^{+3} , Mn^{+2} o Fe^{+3} , los cuales, en altas concentraciones son tóxicos para la vida vegetal (Halvin *et al.*, 1999). De esta forma, la NC puede ser expresada como la inactivación del Al^{+3} u otro catión tóxico (McLean y Brown, 1984). Así, McBride (1994) definió la NC como la cantidad de $CaCO_3$ necesaria para neutralizar el Al intercambiable a un nivel que no sea tóxico para un cultivo.

Los análisis rutinarios de suelo usualmente contemplan la medición de variables del suelo

que están relacionadas o que pueden ser relacionadas con la CT. De esta forma, la suma de bases (SB) podría reflejar la CIC efectiva del suelo, ya que es un componente importante de ella (Halvin *et al.*, 1999). El contenido de MO del suelo refleja por una parte el tipo de suelo (Rodríguez, 1993) y el efecto de las condiciones de manejo de la MO (Halvin *et al.*, 1999; Brady y Weil, 1999) y es, además, un parámetro directo de influencia en la CT. El pH del suelo refleja a su vez la condición de acidez activa y el contenido de Al intercambiable del suelo. De esta forma, este estudio plantea evaluar la variación de la CT de pH y relacionarla con la variación del pH inicial, la SB y el contenido de MO, medidos en análisis rutinarios de suelo. Adicionalmente, evaluar la variación en la CT de Al³⁺ intercambiable y su relación con el pH inicial, la SB y la MO.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se seleccionaron 710 muestras de suelo analizadas por el laboratorio de suelos del

Instituto de Ingeniería Agraria y Suelos de la Universidad Austral de Chile, Valdivia, durante los años 1997-1998. Las muestras se seleccionaron a través de un análisis de frecuencia, clasificándose según tres criterios: a) pH inicial, muestras de suelos con distinto pH e iguales rangos de SB y MO; b) SB, muestras de suelos con distinto nivel de suma de bases (SB) e iguales rangos de pH inicial y MO; y c) MO, muestras de suelos con distinto nivel de materia orgánica e iguales rangos de pH y SB.

La caracterización de los tres grupos de muestras de suelo se presenta en el Cuadro 1. De éstas se seleccionaron 14 muestras y se convalidaron los resultados midiendo nuevamente los niveles de pH (H₂O y CaCl₂ 0,01M) y contenidos de MO por el método de Walkley y Black, la SB intercambiable mediante extracción con acetato de amonio a pH 7,0 y Al intercambiable por extracción con KCl 1 M, de acuerdo a las metodologías establecidas en Sadzawka (1990).

Cuadro 1. Caracterización química de las muestras de suelo seleccionadas.
Table 1. Chemical characterization of the selected soil samples.

Suelo	Rango de materia orgánica (%)	Rango de suma de bases cmol _c kg ⁻¹ suelo	Nivel inicial de pH-H ₂ O	Nivel inicial de pH-CaCl ₂
Caracterización de los suelos según su nivel de pH (pH)				
pH1	16 – 19	5,36 – 5,86	5,0	4,76
pH2	16 – 19	5,36 – 5,86	5,2	4,92
pH3	16 – 19	5,36 – 5,86	5,3	5,03
Caracterización de los suelos según su nivel de suma de bases (SB)				
SB1	16 – 19	2,3	5,3	4,9
SB2	16 – 19	3,5	5,3	4,9
SB3	16 – 19	4,4	5,3	4,9
SB4	16 – 19	4,8	5,3	4,9
SB5	16 – 19	6,7	5,3	4,9
SB6	16 – 19	8,3	5,3	4,9
Caracterización de los suelos según su contenido inicial de materia orgánica (MO)				
MO1	11,6	4,3 – 5,3	5,2	4,9
MO2	18,8	4,3 – 5,3	5,2	4,9
MO3	19,0	4,3 – 5,3	5,2	4,9
MO4	20,9	4,3 – 5,3	5,2	4,9
MO5	26,8	4,3 – 5,3	5,2	4,9

Las muestras seleccionadas se colocaron en bolsas plásticas (50 g de suelo seco al aire y tamizado a 2 mm), a los que se adicionaron cantidades crecientes de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ equivalentes a 0; 1; 2; 4; y 6 g $\text{CaCO}_3 \text{ kg}^{-1}$ de suelo, y agua destilada hasta alcanzar la máxima capacidad de retención de agua del suelo (CRA), para lo cual se utilizó un embudo cerrado en su parte inferior con algodón al cual se agregaron 50 g de suelo. El suelo se saturó con 100 mL de agua y después de permitir el completo drenado por una noche, posteriormente se pesó el embudo para medir la cantidad de agua retenida en el suelo (Zagal *et al.*, 2003). Las muestras húmedas se incubaron en triplicado, a 60°C durante 48 h, y se analizaron para determinar pH en CaCl_2 0,01 M, suma de bases intercambiables (Ca, Mg, K y Na) y Al intercambiable de acuerdo con los métodos descritos por Sadzawka (1990).

Los resultados obtenidos se sometieron a análisis de regresión lineal y/o no lineal, utilizando el programa GraphPad v. 2.0. La pendiente de las rectas y los coeficientes de curvatura se analizaron estadísticamente mediante pruebas de t de Student.

RESULTADOS

Las tres variables analizadas (pH inicial, SB y MO) fueron descritas por una regresión lineal significativa ($P < 0,05$) entre la cantidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ aplicado y el pH obtenido después de la incubación. Para aislar el efecto del pH, a los valores particulares de pH de cada muestra, se descontó el valor de pH final de la incubación de la muestra control (sin aplicación de $\text{Ca}(\text{OH})_2$). De esta forma, los valores sólo reflejan el incremento relativo de pH y se ajustan a una ecuación lineal con un intercepto de 0 (Cuadro 2). Así, la pendiente (b) es el inverso de la CT y sus unidades son $\text{pH g CaCO}_3^{-1} \text{ kg}^{-1}$ de suelo.

Posteriormente, la variación de la pendiente de las regresiones lineales ajustadas fue relacionada linealmente con el valor de la variable analizada (pH inicial, SB, MO). No existió una relación lineal con las variables pH inicial y SB de las muestras estudiadas, a pesar de existir diferencias

significativas entre pendientes. Sin embargo, existe una relación lineal entre la pendiente y el nivel de MO (Cuadro 2). La pendiente varió 1,56 veces en las muestras evaluadas (desde un valor de 11,6 a 26,8% de MO).

Las aplicaciones de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, junto con cambiar el pH aportan cationes Ca^{+2} . Por lo tanto, se evaluó el incremento en el Ca intercambiable. Las variaciones detectadas en el Ca intercambiable fueron descritas por una relación lineal entre Ca aplicado y Ca intercambiable. Para aislar el efecto del contenido inicial de Ca intercambiable de las muestras, se restó el contenido de Ca intercambiable de la muestra incubada sin aplicación de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al contenido de Ca intercambiable después de la incubación con cada dosis de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. De esta forma, la pendiente de la regresión representa el cambio en el contenido de Ca intercambiable debido al Ca agregado (Cuadro 2), es decir el inverso de la capacidad tampón de Ca intercambiable.

Se detectaron diferencias significativas en el aumento del Ca intercambiable en las tres variables evaluadas. Sin embargo, no se pudo establecer una relación lineal entre la variación de la pendiente, el pH y la SB inicial de los suelos. Se observó en la variable pH inicial, que la pendiente (b) correspondiente a la muestra menos ácida difirió de las otras dos. La muestra con mayor nivel de SB fue diferente de las otras cinco. Por otra parte, la muestra de suelo con un mayor contenido de MO (26,8%) incrementó en menor proporción su contenido de Ca intercambiable. En general, en la medida que aumenta el contenido de MO, la pendiente es menor. Sin embargo, la correlación lineal ($r = 0,775$, $P < 0,05$) está afectada por la muestra MO3 que presentó un comportamiento distinto al comportamiento general de las otras muestras de suelo.

El contenido de Al intercambiable disminuyó con el incremento de la dosis de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Esto se describe por una función exponencial ($y = A * \exp(k*x)$) entre $\text{Ca}(\text{OH})_2$ aplicado y Al intercambiable extractado luego de la incubación. Donde A es el valor inicial del Al intercambiable y k el coeficiente de curvatura. Los valores de Al

Cuadro 2. Valores de los parámetros de la ecuación lineal ($y = a + bx$) ajustada entre la dosis de cal aplicada y los incrementos de pH y Ca^{+2} intercambiable.**Table 2. Values of the linear equation parameters ($y = a + bx$) fitted to the dose of lime applied and the increase of pH and exchangeable Ca^{+2} .**

	Parámetros de la regresión lineal			
	Incremento de pH		Incremento de Ca^{+2} intercambiable	
	b^*	R^{2**}	b^*	R^{2**}
Suelos con distinto pH inicial				
pH1	0,196 ± 0,004 ab	0,994	1,390 ± 0,030 a	0,993
pH2	0,206 ± 0,003 a	0,997	1,432 ± 0,023 a	0,996
pH3	0,194 ± 0,003 b	0,997	1,169 ± 0,025 b	0,994
Suelos con distinto nivel de suma de bases (SB)				
SB1	0,235 ± 0,003 ab	0,998	1,319 ± 0,017 b	0,998
SB2	0,191 ± 0,002 d	0,999	1,276 ± 0,020 b	0,996
SB3	0,226 ± 0,002 c	0,999	1,282 ± 0,022 b	0,996
SB4	0,238 ± 0,002 b	0,999	1,259 ± 0,015 b	0,998
SB5	0,184 ± 0,003 e	0,996	1,265 ± 0,018 b	0,997
SB6	0,229 ± 0,003 bc	0,997	1,387 ± 0,019 a	0,997
Suelos con distinto nivel de materia orgánica (MO)				
MO1	0,269 ± 0,009 a	0,983	1,451 ± 0,042 a	0,989
MO2	0,216 ± 0,008 b	0,981	1,249 ± 0,024 b	0,995
MO3	0,199 ± 0,007 b	0,999	1,468 ± 0,022 a	0,997
MO4	0,203 ± 0,002 b	0,982	1,246 ± 0,018 b	0,997
MO5	0,172 ± 0,009 c	0,956	1,168 ± 0,020 c	0,996

Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas al 5% según prueba t de Student.

* Pendiente de la ecuación lineal $y = a + bx$

** Coeficiente de determinación.

intercambiable se expresaron en términos relativos al contenido de Al intercambiable de las muestras sin adición de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, después de la incubación. De esta forma, el valor de A de la ecuación exponencial fue ajustado a 1 y la disminución relativa del contenido de Al intercambiable queda reflejada en la variación del coeficiente de curvatura (Cuadro 3).

La variación del coeficiente de curvatura de las regresiones no lineales ajustadas fue relacionada linealmente con la variación del pH inicial de los suelos. Se detectó diferencia significativa en la disminución del Al intercambiable en la muestra pH1 con respecto a las muestras pH2 y pH3, los cuales no difirieron estadísticamente entre sí. No se pudo establecer una relación lineal entre la variación del coeficiente de curvatura y las variables SB inicial y contenido de MO de los

suelos. Especialmente contrastante resulta la muestra SB6 que nuevamente se aparta de la tendencia observada (Cuadro 3).

DISCUSIÓN

La escasa variación agronómica (aunque estadísticamente significativa) de la pendiente entre la dosis de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y el incremento de pH para las tres variables analizadas, permite estimar una única ecuación, ($y = 0,199x$) con un error estándar de $\pm 0,002$ y un coeficiente de determinación de 0,995. De esta forma, se puede indicar que en los suelos con 16 a 19% de MO, SB entre 5,4 y 5,9 $\text{cmol}_+ \text{kg}^{-1}$ y $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ entre 4,7 y 5,1, el incremento de pH es de 0,20 unidades por cada gramo de $\text{CaCO}_3 \text{ kg}^{-1}$ de suelo. Esto representa un cambio de 0,14 unidades de pH por cada tonelada de CaCO_3 aplicado a una hectárea

Cuadro 3. Parámetros de la ecuación exponencial ($y = A * \exp^{(k*x)}$) ajustada en la relación dosis de cal aplicada y la disminución de Al intercambiable.

Table 3. Exponential equation ($y = A * \exp^{(k*x)}$) parameters fitted to the relation dose of lime applied and the decrease of exchangeable Al.

	Parámetros de la regresión no lineal		
	A*	k**	R ^{2***}
Suelos con distinto pH inicial			
pH1	1	-0,672 ± 0,02 b	0,994
pH2	1	-0,556 ± 0,02 a	0,989
pH3	1	-0,502 ± 0,03 a	0,975
Suelos con distinto nivel de suma de bases (SB)			
SB1	1	-0,782 ± 0,018 d	0,997
SB2	1	-0,697 ± 0,023 bc	0,994
SB3	1	-0,604 ± 0,021 a	0,992
SB4	1	-0,680 ± 0,018 b	0,996
SB5	1	-0,607 ± 0,019 a	0,993
SB6	1	-0,745 ± 0,013 cd	0,998
Suelos con distinto nivel de materia orgánica (MO)			
MO1	1	-0,783 ± 0,105 bc	0,899
MO2	1	-1,006 ± 0,119 cd	0,934
MO3	1	-0,721 ± 0,021 b	0,940
MO4	1	-1,304 ± 0,166 d	0,995
MO5	1	-0,495 ± 0,013 a	0,995

Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas al 5% según prueba t de Student.

* Valor inicial relativo del contenido inicial de Al intercambiable ajustado a 1.

** Coeficiente de curvatura de la ecuación de exponencial.

*** Coeficiente de determinación.

de suelo con densidad aparente de 700 kg m⁻³ y a 0,20 m de profundidad. Resultados similares son mencionados por Mora (1993) y por Mora y Demanet (1999) en suelos de la IX Región. Este valor también es similar al utilizado por Rodríguez *et al.* (2001) como valor modal a ser utilizado en suelos derivados de cenizas volcánicas (trumaos y rojos arcillosos) los cuales presentan valores de 0,12 y 0,15, respectivamente.

Al estimar el efecto de la variable SB en el incremento del pH, se diferencian dos pendientes. Para las muestras SB1, SB3, SB4 y SB6 corresponde a 0,232 ± 0,001, en tanto que para las muestras SB2 y SB5 el valor es de 0,187 ± 0,002. La pequeña amplitud de las constantes MO y pH no explica la causa de esta variación del inverso de la CT. Es posible que esté relacionado con el tipo de arcilla y óxidos hidratados

presentes, que son otra de las fuentes de adición de protones en el sistema, y, por lo tanto, responsables de la acidez potencial (Rowell, 1994; Brady y Weil, 1999). El contenido de Al intercambiable de las muestras SB, varió entre 0,15 y 0,32 cmol₊ kg⁻¹ a pesar del escaso rango de pH (4,85 a 4,90); los valores menores, en promedio, correspondieron a las muestras SB2 y SB5, cuyo valor fue de 0,16, en tanto que el resto, en promedio, presentaron valores de 0,27. Para determinar el peso de esta variable se requieren estudios más específicos. Sin embargo, Mora (1993) muestra en su estudio que la magnitud del encalado dependió del contenido de Al intercambiable.

El contenido de MO de los suelos afectó linealmente el incremento del pH (pendiente). En la medida que aumenta el contenido de MO,

disminuye en forma lineal el valor de b . Sin embargo, en el caso de MO3 el valor de b se aparta de la relación lineal. La ecuación fue $y = 0,335 - 0,0063x$ ($r^2 = 0,932$). Esta relación entre MO y el incremento de pH del suelo indica que suelos con menor nivel de MO tendrán un mayor incremento del pH. Cabe preguntarse si este efecto se debe al contenido de MO del suelo en sí mismo o a otras propiedades que definen el tipo de suelo, ya que ha sido mostrado por Rodríguez (1993) que los diferentes tipos de suelos varían en su contenido de MO, lo cual puede estar asociado al tipo de arcilla (Percival *et al.*, 2000). De esta forma, suelos rojos arcillosos presentan siempre valores más bajos de MO que los trumaos y éstos que los Ñadis. Así las estimaciones de CT mencionadas por Rodríguez *et al.* (2001) son menores para los suelos rojo arcillosos y mayores para los suelos trumaos. Se ha mostrado en diversas partes del mundo (Pérez, 1986; Rowell 1994), que un aumento en el nivel de MO afecta el aumento del pH, por unidad de cal aplicada.

Por cada gramo de $\text{CaCO}_3 \text{ kg}^{-1}$ de suelo, se agregan $2 \text{ cmol}_+ \text{ Ca}$. Sin embargo, sólo parte de éste queda como Ca intercambiable. Para las muestras de suelo más ácidas (pH1 y pH2), aproximadamente el 70% del Ca aplicado ($1,46 \text{ cmol}_+ \text{ Ca}$ por gramo de $\text{CaCO}_3 \text{ kg}^{-1}$ de suelo) fue extraído como Ca intercambiable. En cambio, para la muestra pH3 el Ca intercambiable aumentó en 58% ($1,17 \text{ cmol}_+ \text{ Ca}$ por gramo de $\text{CaCO}_3 \text{ kg}^{-1}$ de suelo). En este estudio no se pudo establecer una relación lineal entre el nivel de pH inicial del suelo y la variación de la pendiente (b), probablemente por el bajo número de muestras de suelo evaluadas con variación en el pH inicial. Los resultados de este estudio indican que el pH del suelo, en el rango estudiado, no afecta la proporción de Ca aplicado que queda en forma intercambiable, implicando que otros mecanismos de reacción diferentes de la adsorción no específica han tomado lugar.

Al evaluar la relevancia de la SB en el aumento de Ca intercambiable, se observa que la muestra SB6 ($8,34 \text{ cmol}_+ \text{ kg}^{-1}$) incrementa la pendiente de la relación. Esto hace suponer que la diferencia

detectada corresponde a otros factores que influyen en la disponibilidad del Ca en formas intercambiables. Dado el aumento lineal del Ca intercambiable con la dosis de cal se infiere que, por cada $\text{g CaCO}_3 \text{ kg}^{-1}$ de suelo, el Ca intercambiable aumenta aproximadamente $1,3 \text{ cmol}_+ \text{ kg}^{-1}$. Esto corresponde al 65% del Ca aplicado extraído como Ca intercambiable. La pendiente entre la adición de Ca y el incremento de Ca intercambiable indica que se recupera como Ca entre el 58 y 74% del Ca aplicado. Esta variación se correlaciona con el nivel de MO de los suelos, al igual que el incremento de pH. Esto permite suponer que el contenido de MO influye o está correlacionado con algún otro parámetro que permite ordenar los suelos con relación a su CT.

Las diferencias en la pendiente que define el aumento del Ca intercambiable en los suelos analizados, pueden no ser agrónomicamente relevantes. Al promediar todos las muestras de suelo, se obtiene un valor de incremento de $1,32 \text{ cmol}_+ \text{ kg}^{-1}$. Esto implica que se requieren $1.070 \text{ kg de CaCO}_3 \text{ ha}^{-1}$ (dap 700 kg m^{-3} y $0,2 \text{ m}$ de profundidad) para aumentar el Ca intercambiable en $1 \text{ cmol}_+ \text{ ha}^{-1}$. Si bien, dicho valor subestima en 130 kg de CaCO_3 las necesidades de los suelos pH3 y MO5, que presentaron mayores requerimientos de cal, significaría una subestimación de no más del 15% de la dosis y una sobreestimación del 1% en el resto de los suelos (Figura 1 A). Los resultados de este estudio concuerdan con los reportados por López (1987), quien determinó aumentos promedios de $1,27 \text{ cmol}_+ \text{ de Ca kg}^{-1}$ de suelo, en condiciones de campo en suelos volcánicos en Venezuela.

El análisis estadístico mostró disminuciones de Al intercambiable cercanas al 50% con respecto al valor anterior, por cada $\text{g de CaCO}_3 \text{ kg}^{-1}$ agregado y que dicha disminución depende principalmente del nivel inicial de pH del suelo. Sin embargo, las pequeñas variaciones encontradas sugieren que es posible aplicar una ecuación exponencial común para condiciones de campo, con una subestimación de aproximadamente 15%.

Internacionalmente se usa el parámetro porcentaje de saturación de Al en conjunto al pH, como indicador de la acidez de los suelos. Estos indicadores permiten estimar las posibilidades de éxito al establecer un cultivo en un suelo determinado. Dado que el porcentaje de saturación de Al (%SAI) depende del Al intercambiable y de la SB de los suelos, la disminución de este indicador depende de ambos parámetros (SB y Al). La aplicación de cal aumenta el Ca intercambiable y disminuye el Al, por lo tanto, la disminución del %SAI será mayor que la disminución del Al intercambiable, lo cual se refleja en un menor valor del coeficiente de curvatura de la relación dosis de cal y disminución relativa del %SAI.

La Figura 1B muestra el comportamiento promedio de los distintos suelos evaluados en la disminución del %SAI con la dosis de cal. Las dosis de cal aplicadas ($\text{g CaCO}_3 \text{ kg}^{-1}$ de suelo) corresponden a valores equivalentes a 0; 1,4; 2,8; 5,6 y 8,4 t de $\text{CaCO}_3 \text{ ha}^{-1}$ (considerando una densidad aparente de 700 kg m^{-3} y una profundidad de 0,2 m).

La disminución del %SAI para los suelos estudiados es representada por la ecuación $y = \exp^{-0,864x}$. Una de las 14 muestras no fue considerada en la ecuación planteada (muestra pH3). Esta muestra fue

considerada como dispar en la tendencia general y no se determinaron razones que expliquen su comportamiento diferente, lo que sugiere que su comportamiento estaría determinado por otros factores no evaluados en este estudio.

En general, por cada gramo de $\text{CaCO}_3 \text{ kg}^{-1}$ aplicado, el %SAI disminuyó en 57% con respecto al valor anterior. Valores similares han sido determinados por Mora y Demanet (1999), para los suelos de la zona sur de Chile (trumaos y rojos arcillosos) a partir de ensayos de campo. De la ecuación estimada ($y = \exp^{-0,864x}$) se deduce que con dosis de $0,80 \pm 0,25 \text{ g}$ de CaCO_3 para todos los suelos evaluados, la disminución del %SAI será equivalente a un 50%. La adaptación de esta ecuación a condiciones de terreno dependerá básicamente del volumen y masa del suelo, es decir, influirá tanto la densidad aparente como la profundidad que se considere.

La ecuación general que define la disminución promedio del %SAI con la dosis de cal sobreestima y subestima un 32% las necesidades de cal. De esta forma, considerando que la dosis promedio de cal para disminuir en un 50% el %SAI es de $1.123 \text{ kg CaCO}_3 \text{ ha}^{-1}$, se tiene que estos errores corresponden a 360 kg de $\text{CaCO}_3 \text{ ha}^{-1}$.

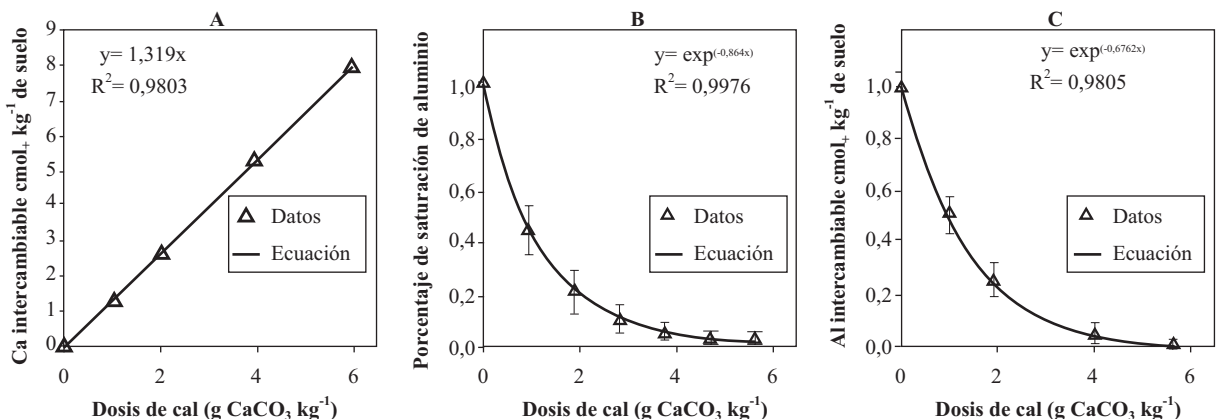


Figura 1. (A) Aumento promedio del contenido de Ca intercambiable en los suelos estudiados; (B) Disminución relativa del porcentaje de saturación de Al según dosis de carbonato de calcio; y (C) Disminución relativa del Al intercambiable según dosis de carbonato de calcio.

Figure 1. (A) Average increase in the content of exchangeable Ca in the studied soils; (B) Relative decrease of the percentage of saturation of Al according to the dose of calcium carbonate; and (C) Relative decrease of exchangeable Al according to the dose of calcium carbonate.

CONCLUSIONES

El nivel de acidez inicial y el contenido de materia orgánica influyen en la capacidad tampón de pH de los suelos. Además, el nivel inicial de acidez influye sobre la disminución del contenido de Al intercambiable y el contenido inicial de materia orgánica influye sobre el aumento del Ca intercambiable. Las variaciones observadas en los parámetros de acidez de los suelos debidas al nivel inicial de suma de bases no son consistentes con la variación del contenido de suma de bases.

Los suelos mostraron mayores requerimientos de cal en la medida que aumentó el contenido de materia orgánica. También el aumento del

contenido de calcio intercambiable con la adición de cal dependió en forma lineal del contenido de materia orgánica de los suelos. Sin embargo, la disminución del contenido de Al intercambiable no fue influenciada por los distintos contenidos iniciales de materia orgánica.

Las diferencias detectadas en las variables de estudio permiten establecer un comportamiento agronómico general de los suelos. Por cada gramo de CaCO₃ adicionado por kilogramo de suelo, el pH aumentó en 0,2 unidades, el contenido de Al intercambiable disminuyó en un 50%, el nivel de calcio aumentó en 1,3 cmol₊ kg⁻¹ de suelo, la suma de bases del suelo aumentó en igual proporción que el Ca y el porcentaje de saturación de aluminio disminuyó en un 57%.

LITERATURA CITADA

- Brady, N., and R. Weil. 1999. The nature and properties of soils. 881 p. 12th ed. Prentice Hall, New Jersey, USA.
- FAO. 1970. Physical and chemical methods of soil and water analysis. Soil Bull. N° 10. Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.
- Fassbender, H. 1987. Química de los suelos con énfasis en suelos de América Latina. 420 p. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), San José, Costa Rica.
- Halvin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale, and W.L. Nelson. 1999. Soil fertility and fertilizer. An introduction to nutrient management. 497 p. 6th ed. Prentice Hall, New Jersey, USA.
- Honorato, R. 2000. Manual de edafología. 267 p. 4^a ed. Universidad Católica de Chile Ediciones, Santiago, Chile.
- López, I. 1987. Efecto residual de cal en un suelo oxisol después de cuatro años de aplicaciones de la enmienda. Disponible en http://www.redpav-fpolar.info.ve/agrotrop/v36_1-3/v363a008.html Leído el 22 de diciembre de 2003.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. 889 p. 2nd ed. Academic Press, London, Great Britain.
- McBride, M. 1994. Environmental chemistry of soils. 406 p. Oxford University Press, New York, USA.
- McLean, E., and J. Brown. 1984. Crop response to lime in the Midwestern United States. p. 269-299. In Adams (ed). Soil acidity and liming. ASA, Madison, Wisconsin, USA.
- Mora, M. 1993. Nivel de fertilidad de los suelos de la IX Región y su relación con la acidificación. Frontera Agrícola (Chile) 1:5-12.
- Mora, M., y F. Demanet. 1999. Uso de enmiendas calcáreas en suelos acidificados. Frontera Agrícola (Chile) 5:43-58.
- Percival, H.J, R.L. Parfitt, y N.A. Scott. 2000. Factors controlling soil carbon levels in New Zealand grasslands. Is clay content important? Soil Sci. Soc. Am. J. 64:1623-1630.
- Pérez, R. 1986. Efectos del encalado en la neutralización del aluminio intercambiable y sobre el crecimiento del tomate (*Lycopersicon esculentum*). Disponible en <http://www.redpav-fpolar.info.ve> Leído el 15 de diciembre de 2003.
- Rodríguez, J. 1993. La fertilización de los cultivos, Un método racional. 291 p. Colección en Agricultura. Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Agronomía, Santiago, Chile.

- Rodríguez, J., D. Pinochet, y F.J. Matus. 2001. Fertilización de los cultivos. 117 p. LOM Ediciones, Santiago, Chile.
- Rowell, D.L. 1994. Soil science; methods and applications. 350 p. Longman, London, UK.
- Sadzawka, A. 1990. Métodos de análisis de suelos. 130 p. Serie La Platina Nº 16. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación La Platina, Santiago, Chile.
- Suárez, D., y M. Márquez. 1992. Estimación de las necesidades de encalado. Agric. Téc. (Chile) 52:388-393.
- Tan, K. 1993. Principles of soil chemistry. 362 p. 2nd ed. Marcel Dekker, New York, USA.
- Zagal, E., L. Longeri, I. Vidal, G. Hoffman, y R. González. 2003. Influencia de la adición de nitrógeno y fósforo sobre la descomposición de paja de trigo en un suelo derivado de cenizas volcánicas. Agric. Téc. (Chile) 63:403-415.