

## FIJACIÓN DE AMONIO EN SEIS SUELOS DE LA VIII REGIÓN DE CHILE<sup>1</sup>

### Ammonium fixation in six Chilean soils from the VIII Region of Chile

Luis Longeri S.<sup>2</sup>, Iván Vidal P.<sup>2</sup> y Myriam Fernández D.<sup>2</sup>

#### ABSTRACT

The purpose of this study was to determine the fixed native  $\text{NH}_4^+$  and the artificial and total fixing capacities in 36 superficial (0-25 cm) soil samples from six soil series of the VIII Region: Diguillín (Andisol), Santa Bárbara (Andisol), Collipulli (Ultisol), San Carlos (Alfisol), Cauquenes (Alfisol) and Quella (Vertisol). The fixed native  $\text{NH}_4^+$  ranged from 0 to 41.2 mg N  $\text{kg}^{-1}$ , with 1.1 to 2.5 as mean values in the allophanic series (Andisols) and 5.9 to 15.9 in the non-allophanic series. The artificial fixation capacity varied between 0.1 and 72.8 mg N  $\text{kg}^{-1}$  with 1.6 to 2.3 as mean values in the allophanic series, and 17.5 to 37.6 in the non-allophanic series, while the total fixing capacity varied from 0.3 to 80.9 mg N  $\text{kg}^{-1}$  with 3.4 to 4.1 and 23.4 to 47.0 as mean values in the first and second soil groups, respectively. Ammonium fixation mainly correlated with the exchangeable cations that expand the clay's lattice. Soil containing 2:1 clays or feldspar fixed more  $\text{NH}_4^+$  than other soils.

**Key words:** non-exchangeable ammonium, nitrogen, clays, alophan.

#### RESUMEN

El objetivo de este estudio fue determinar el contenido de  $\text{NH}_4^+$  nativo fijado y las capacidades de fijación inducida y total de 36 muestras superficiales (0-25 cm) de suelos pertenecientes a 6 series de la VIII Región: Diguillín (Andisol), Santa Bárbara (Andisol), Collipulli (Alfisol), San Carlos (Alfisol), Cauquenes (Alfisol), Quella (Vertisol). El  $\text{NH}_4^+$  nativo fijado fluctuó entre 0 y 41 mg N  $\text{kg}^{-1}$ , con valores promedios de 1,1 a 2,5 en las series alofánicas (Andisoles) y de 5,9 a 15,9 en las series no alofánicas. La capacidad de fijación inducida varió entre 0,1 y 73 mg N  $\text{kg}^{-1}$ , con valores promedio de 1,6 a 2,3 en las series alofánicas y de 17,5 a 37,6 en las series no alofánicas, mientras que la capacidad total de fijación varió entre 0,3 y 81 mg N  $\text{kg}^{-1}$ , con valores promedio de 3,4 a 4,1 y de 23,4 a 47,0 en el primer y segundo grupo de series, respectivamente. La fijación de  $\text{NH}_4^+$  se asoció principalmente al contenido de los cationes de intercambio que expanden la red de las arcillas. Los suelos que contienen arcillas 2:1 o feldespatos fijaron más  $\text{NH}_4^+$  que los otros suelos.

**Palabras claves:** amonio no intercambiable, nitrógeno, arcillas, alofán.

#### INTRODUCCIÓN

El N inorgánico se encuentra presente en el suelo a las formas de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NO}_2^-$  solubles,

$\text{NH}_4^+$  disuelto en la solución de suelo, adsorbido a los coloides como  $\text{NH}_4^+$  de intercambio y como  $\text{NH}_4^+$  fijado. El  $\text{NH}_4^+$  fijado se define como el  $\text{NH}_4^+$  que está retenido por el suelo en una forma que no es libre ni fácilmente intercambiable, o que no puede ser removido por una prolongada extracción con una solución salina de K (Feigenbaum *et al.*, 1994). Kudeyarov (1981) sugirió los términos nativo y artificial, refiriéndose con ellos al  $\text{NH}_4^+$  fijado durante los

<sup>1</sup>Recepción originales: 16 de mayo de 2000 (reenviado). Investigación financiada por Proyecto FONDECYT 1971004.

<sup>2</sup>Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía, Departamento de Suelos, Casilla 537, Chillán, Chile. E-mail: ivalid@udec.cl

procesos de formación del suelo y a la fijación adicional producto de la aplicación de fertilizantes amoniacales, respectivamente (Doram y Evans, 1983; Breitenbeck y Paramasivam, 1995).

El  $\text{NH}_4^+$  nativo fijado representa un 60-98% del N mineral (Doram y Evans, 1983; Paramasivam y Breitenbeck, 1994; Feigenbaum *et al.*, 1994) y del 1-48% del N total del suelo (Kudeyarov, 1981; Doram y Evans, 1983; Keerthisinghe *et al.*, 1984; Smith *et al.*, 1994).

En suelos de diferentes partes del mundo se ha encontrado una amplia variación en el contenido de  $\text{NH}_4^+$  nativo fijado, informándose valores entre 7 y 1.946  $\text{mg kg}^{-1} \text{N-NH}_4$  (Dalal, 1977). En muchos suelos, la capacidad de fijación inducida es inferior a 180  $\text{mg kg}^{-1} \text{N-NH}_4$  (Nômmik, 1981). No obstante, Cox *et al.* (1996) informaron un valor máximo de 937  $\text{mg kg}^{-1} \text{N-NH}_4$ .

La fijación de  $\text{NH}_4^+$  es un proceso que ocurre principalmente en los suelos en los que predominan filosilicatos secundarios del tipo 2:1, tales como vermiculita, illita y montmorillonita. Tanto la illita como la vermiculita fijan  $\text{NH}_4^+$  bajo condiciones de hidratación, mientras la montmorillonita sólo fija después de secada (Chen *et al.*, 1989). Las arcillas del tipo 1:1, como caolinita y haloisita, que se caracterizan por no presentar una expansión interlamina por hidratación, no fijan cantidades significativas de  $\text{NH}_4^+$ , en tanto las arcillas amorfas como el alofán no tienen poder de fijación (Bajwa, 1982). Se ha informado, además, que minerales silícicos primarios, tales como micas y feldspatos, tienen también la capacidad de retener  $\text{NH}_4^+$  en forma no extraíble con KCl (Adams y Stevenson, 1964).

El mecanismo de fijación resulta principalmente del reemplazo de los cationes interlaminares (Ca, Mg, Na e H) por el  $\text{NH}_4^+$  en la red expandida de los minerales arcillosos y se debe a que la baja energía de hidratación (85  $\text{kcal mol}^{-1}$ ) determina deshidratación y colapso de entrecapa-

pas y la fijación consecuente de este catión. Además, el tamaño del ión  $\text{NH}_4^+$ , que es de 2,86 Å permite un calce exacto en la cavidad hexagonal del oxígeno estructural de las hojas tetraédricas facilitando el colapso de las capas. También, la posición de la carga isomórfica negativa en hojas tetraédricas u octaédricas es muy importante, ya que estará más cerca o más lejos del catión adsorbido reteniéndolo más o menos firmemente (Williamd y Ferrel, 1991).

La disponibilidad del  $\text{NH}_4^+$  fijado para las plantas y microorganismos ha sido un tema conflictivo. Las primeras investigaciones encontraron que sólo una pequeña fracción de este  $\text{NH}_4^+$  era disponible (Axley y Legg, 1960; Walsh y Murdock, 1960). Investigaciones más recientes, usando fertilizantes marcados con  $^{15}\text{N}$ , han demostrado que el  $\text{NH}_4^+$  fijado reciente está activamente involucrado en la dinámica del N en el suelo (Preston, 1982; Marzadori *et al.*, 1989; Feigenbaum *et al.*, 1994).

Dado que en Chile no se han realizado estudios en relación a este tema, el objetivo de la presente investigación es determinar el contenido de  $\text{NH}_4^+$  nativo fijado y la capacidad fijadora de  $\text{NH}_4^+$  de algunos suelos representativos de la VIII Región.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los suelos usados en esta experiencia se seleccionaron de acuerdo al tipo de arcilla predominante, según Guerra (1973), Besoain *et al.* (1984), Besoain *et al.* (1987) y Delgado (1983). Estos suelos corresponden a las series Diguillín (medial, térmica, Typic Melanoxerands), Santa Bárbara (medial, mésica, Typic Haploxerands), Collipulli (muy fina, mixta, térmica, Typic Rhodoxeralfs), San Carlos (fina, mixta, térmica, Ultic Palexeralf), Cauquenes (fina, caolinítica, isomésica, Ultic Palexeralfs) y Quella (fina, smectítica, térmica, Aquic Durixererts). Se colectaron 6 muestras superficiales (0-25 cm) por cada serie. Las muestras fueron secadas al aire y tamizadas a través de una malla de 2 mm.

También se anotó el uso actual de cada lugar de muestreo.

Estos suelos fueron caracterizados en las siguientes propiedades físicas y químicas: textura (USDA), densidad aparente (DA), pH agua (1:2,5), materia orgánica (MO), N-NO<sub>3</sub>, N-NH<sub>4</sub> intercambio, N-total, P-Olsen, cationes de intercambio (K, Ca, Na, Mg y Al). La capacidad de intercambio catiónica efectiva (CICE) se calculó sumando los cationes de intercambio.

El NH<sub>4</sub><sup>+</sup> nativo fijado se determinó tratando los suelos con KOBr para eliminar el N orgánico y el NH<sub>4</sub><sup>+</sup> de intercambio antes de la digestión con una mezcla HF:HCl, siguiendo el método A de Silva y Bremner (1966), pero aumentando la dosificación de KOBr al doble (40 mL g<sup>-1</sup>) debido al alto contenido de MO de algunas muestras. Este método ha sido reconocido como el que presenta los valores más exactos y libres de defectos (Paramasivam y Breitenbeck, 1994). El procedimiento usado para determinar la capacidad total de fijación de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> fue el de saturación con NH<sub>4</sub>Cl, seguido del método mencionado anteriormente. La capacidad de fijación inducida de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> se obtuvo por diferencia entre la capacidad total de fijación y el contenido de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> nativo fijado. El N orgánico se calculó por diferencia entre el N total y N inorgánico (suma del NH<sub>4</sub><sup>+</sup> fijado, de intercambio y del NO<sub>3</sub><sup>-</sup>).

Las variables físicas y químicas de los suelos se sometieron a análisis de correlación simple y de regresión múltiple stepwise (SYSTAT Inc. USA) con el fin de identificar las propiedades que se relacionan con el contenido de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> nativo fijado y con las capacidades de fijación inducida y total.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Amonio nativo fijado y distribución del N del suelo

Las distintas fracciones del N de las 36 muestras de suelos se indican en el Cuadro 1. El conte-

nido de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> nativo fijado fluctuó entre 0 y 41 mg kg<sup>-1</sup> N-NH<sub>4</sub>, constituyendo esta fracción como máximo hasta un 68% del N mineral y 3% del N total del suelo. Estos valores son inferiores a los informados en la literatura (Dalal, 1977; Sowden *et al.*, 1978; Kudeyarov, 1981; Doram y Evans, 1983; Paramasivam y Breitenbeck, 1994; Steffens y Sparks, 1997), tanto en relación al rango de 7 a 1.946 mg kg<sup>-1</sup> de N-NH<sub>4</sub> nativo fijado como a los porcentajes que representa esta fracción en relación al N mineral (60 al 98%) y al N total (1 al 48%).

Los suelos alofánicos de las series Diguillín y Santa Bárbara, derivados de cenizas volcánicas recientes (andisoles), presentaron los menores contenidos de N-NH<sub>4</sub> nativo fijado, con valores promedios de 1,1 y 2,5 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente. En las muestras de las otras series de suelos esta fracción presenta promedios de 5,9; 8,5; 9,3 y 15,9 mg kg<sup>-1</sup>, correspondientes a las series Collipulli, Quella, San Carlos y Cauquenes.

Los contenidos promedio de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> nativo fijado se relacionaron en cierto grado con las arcillas predominantes en los distintos suelos (Cuadro 2), puesto que, según Kudeyarov (1981), el poder de fijación es casi nulo en el alofán, bajo en las arcillas 1:1 (haloisita, metahaloesita, caolinita) y mayor en las arcillas 2:1 (illita, vermiculita, montmorillonita). La excepción a esta tendencia se presentó en la serie Quella, en la que predominan arcillas 2:1, que debería haber tenido los valores mayores. El hecho que el contenido de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> nativo fijado no se haya relacionado directamente con la mineralogía de la fracción arcilla puede deberse a que su contenido puede modificarse por el manejo. Se ha encontrado que los suelos cultivados tienen menos NH<sub>4</sub><sup>+</sup> nativo fijado que los suelos no cultivados o de praderas (Sowden *et al.*, 1978), pero más que los suelos de bosques (Baethgen y Alley, 1987) y los suelos sin leguminosas menos que los con leguminosas (Baethgen y Alley, 1987).

**Cuadro 1.** Contenido de amonio nativo fijado y distribución de las diferentes fracciones del nitrógeno del suelo**Table 1.** Fixed native ammonium content and distribution of the different soil nitrogen fractions

Serie	N-NH <sub>4</sub> interc. mg kg <sup>-1</sup>	N-NO <sub>3</sub> mg kg <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> nativo fijado mg kg <sup>-1</sup>	N mineral mg kg <sup>-1</sup>	N orgánico mg kg <sup>-1</sup>	N total mg kg <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> fijado % del N mineral	N-NH <sub>4</sub> fijado % del N total
<b>Diguillín</b>								
<b>Promedio</b>	<b>16,3</b>	<b>50,3</b>	<b>1,1</b>	<b>67,7</b>	<b>5.295</b>	<b>5.363</b>	<b>2,3</b>	<b>0,02</b>
Mínimo	6,5	12,5	0,0	32,1	3.476	3.539	0,0	0,00
Máximo	24,0	141,0	5,2	161,5	6.210	6.250	9,9	0,09
λ <sup>1</sup>	6,8	47,4	2,0	47,3	1.089	1.065	3,8	0,04
<b>Santa Bárbara</b>								
<b>Promedio</b>	<b>13,1</b>	<b>17,8</b>	<b>2,5</b>	<b>33,4</b>	<b>4.742</b>	<b>4.775</b>	<b>7,8</b>	<b>0,06</b>
Mínimo	6,5	0,5	0,0	17,8	3.434	3.472	0,0	0,00
Máximo	26,0	34,5	5,7	46,7	7.044	7.078	20,4	0,13
λ	7,7	16,2	2,2	12,3	1.243	1.242	7,58	0,05
<b>Collipulli</b>								
<b>Promedio</b>	<b>17,8</b>	<b>1,4</b>	<b>5,9</b>	<b>25,2</b>	<b>1.688</b>	<b>1.714</b>	<b>24,0</b>	<b>0,39</b>
Mínimo	9,5	0,0	3,7	13,7	613	627	11,6	0,12
Máximo	25,5	3,5	10,8	31,7	2.902	3.934	38,2	0,68
λ	6,3	1,5	3,1	7,3	745	751	9,9	0,22
<b>San Carlos</b>								
<b>Promedio</b>	<b>26,5</b>	<b>0,5</b>	<b>9,3</b>	<b>36,3</b>	<b>2.544</b>	<b>2.580</b>	<b>25,9</b>	<b>0,36</b>
Mínimo	18,5	0,0	7,1	28,7	2.296	2.330	22,2	0,30
Máximo	37,0	1,5	11,2	49,7	3.364	3.405	35,6	0,44
λ	6,2	0,8	1,8	7,9	407	410	5,0	0,06
<b>Cauquenes</b>								
<b>Promedio</b>	<b>12,8</b>	<b>10,4</b>	<b>15,9</b>	<b>39,1</b>	<b>1.122</b>	<b>1.161</b>	<b>36,7</b>	<b>1,23</b>
Mínimo	7,5	0,5	2,3	14,7	628	650	12,6	0,22
Máximo	24,5	35,0	41,2	87,8	1.760	1.848	68,5	3,09
λ	6,0	12,3	15,4	29,0	378	404	19,0	1,00
<b>Quella</b>								
<b>Promedio</b>	<b>18,3</b>	<b>12,8</b>	<b>8,5</b>	<b>39,5</b>	<b>1.370</b>	<b>1.410</b>	<b>24,5</b>	<b>0,61</b>
Mínimo	7,0	4,5	6,3	20,9	808	840	12,0	0,46
Máximo	43,0	28,5	12,1	59,1	1.781	1.837	40,3	0,75
λ	12,8	10,3	2,0	16,1	333	343	10,3	0,11

<sup>1</sup>λ = Desviación estándar.

**Cuadro 2.** Predominancia relativa de minerales silíceos secundarios y primarios en la fracción arcilla en cada serie de suelo<sup>1</sup>

**Table 2.** Relative predominance of secondary and primary siliceous minerals in each soil series

Suelo	CAO <sup>2</sup>	HAL	ESM	VER	CLO	ILL	ALO/ IMO	GIB	GOE	CUA	FEL	CRI
Diguillín		1			1		5				2	
Santa Bárbara		1-2			2		5	1			1	1
Collipulli	2	5			1	1	1	1		1		1
San Carlos	3	5	4	2	1				1	2		
Cauquenes	3	5		2		2				1	1	
Quella	3	5	4	2						2		

Valores de frecuencia: 5 = dominante; 4 = abundante; 3 = común; 2 = presente; 1 = escaso o raro.

<sup>1</sup>Fuente: Besoain *et al.* (1984), Besoain *et al.* (1987).

<sup>2</sup>CAO: caolinita; HAL: haloisita; ESM: esmectita; VER: vermiculita; CLO: clorita; ILL: illita; ALO/IMO: alofán/imogolita; GIB: gibbsita; GOE: goethita; CUA: cuarzo; FEL: feldespato; CRI: cristobalita.

Excluyendo los suelos alofánicos Diguillín y Santa Bárbara, debido a su nulo o bajo contenido, el contenido promedio de  $\text{NH}_4^+$  nativo fijado fue mayor en suelos con espino (*Acacia caven*) (23,6 mg kg<sup>-1</sup>) seguido en orden decreciente por los suelos de praderas (11,9 mg kg<sup>-1</sup>), cultivos anuales y rastrojos (7,1 mg kg<sup>-1</sup>), bosque y matorrales (6,4 mg kg<sup>-1</sup>), tendencia que concuerda con lo informado por los autores mencionados.

#### Fijación inducida y capacidad total de fijación de $\text{NH}_4^+$

Los valores de fijación inducida y capacidad total de fijación de  $\text{NH}_4^+$ , determinados en las 36 muestras de suelo se presentan en el Cuadro 3, expresados en mg kg<sup>-1</sup> N y kg ha<sup>-1</sup> de N.

La fijación inducida, medida como la diferencia entre  $\text{NH}_4^+$  nativo fijado y el  $\text{NH}_4^+$  fijado después de saturar las muestras con  $\text{NH}_4\text{Cl}$  y que representa la fijación máxima que puede ocurrir en terreno cuando se aplica un fertilizante amoniacal, varió de 0,1 a 73 mg N kg<sup>-1</sup> (0,2 a 227 kg N ha<sup>-1</sup>), correspondiendo los valores menores a un suelo de la serie Santa Bárbara y los mayores a un suelo de la serie Quella.

La capacidad total de fijación, por su parte, va-

rió de 0,3 a 81 mg N kg<sup>-1</sup> (desde 0,7 a 252 kg N ha<sup>-1</sup>), también con los valores más bajos en los suelos alofánicos y con los valores máximos en un suelo Quella.

Al igual que en el caso del  $\text{NH}_4^+$  nativo, los suelos alofánicos presentaron muy bajas capacidades de fijación inducida y total, con valores promedio por serie que no superaron 2,3 mg N kg<sup>-1</sup> (6 kg N ha<sup>-1</sup>) y 4,1 mg N kg<sup>-1</sup> (9 kg N ha<sup>-1</sup>), respectivamente. En los suelos no alofánicos los valores promedio por serie, de la fijación inducida, fluctuaron entre 18 y 38 mg N kg<sup>-1</sup> (61 y 131 kg N ha<sup>-1</sup>) y los valores de la capacidad total de fijación entre 23 y 47 mg N kg<sup>-1</sup> (81 y 163 kg N ha<sup>-1</sup>). La serie Collipulli presentó los valores menores y la serie San Carlos los mayores (Figura 1).

Las capacidades de fijación inducida y total de estos suelos también aparecen como bajas si se comparan con los valores informados en la literatura, los cuales alcanzan máximos de 937 mg N kg<sup>-1</sup> y de 1324 mg N kg<sup>-1</sup>, respectivamente (Cox *et al.*, 1996). Estas diferencias pueden deberse a que, en la mayoría de los estudios se utilizan suelos que, a diferencia de los suelos de la VIII Región, tienen un alto contenido de arcillas 2:1 de elevado poder de fijación.

**Cuadro 3.** Contenido de amonio nativo fijado y capacidades de fijación inducida y total de las 36 muestras de suelos**Table 3.** Fixed native ammonium content, and artificial and total fixing capacities of the 36 soil samples

Serie	N-NH <sub>4</sub> nativo mg kg <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> artificial mg kg <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> total mg kg <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> nativo kg ha <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> artificial kg ha <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> total kg ha <sup>-1</sup>
<b>Diguillín</b>						
<b>Promedio</b>	<b>1,1</b>	<b>2,3</b>	<b>3,4</b>	<b>2,7</b>	<b>6,1</b>	<b>8,8</b>
Mínimo	0,0	0,3	0,3	0	0,8	0,8
Máximo	5,2	5,5	8,7	13,0	15,6	21,8
λ <sup>1</sup>	2,0	2,1	3,2	5,1	5,9	8,3
<b>Santa Bárbara</b>						
<b>Promedio</b>	<b>2,5</b>	<b>1,6</b>	<b>4,1</b>	<b>5,2</b>	<b>3,0</b>	<b>8,2</b>
Mínimo	0,0	0,1	0,4	0,0	0,2	0,7
Máximo	5,7	3,7	6,6	12,9	7,2	14,8
λ	2,2	1,3	2,7	4,8	2,5	5,7
<b>Collipulli</b>						
<b>Promedio</b>	<b>5,9</b>	<b>17,5</b>	<b>23,4</b>	<b>20,4</b>	<b>60,7</b>	<b>81,1</b>
Mínimo	3,7	1,0	5,3	10,1	3,9	19,6
Máximo	10,8	41,5	50,5	39,5	144,6	184,1
λ	3,1	18,2	19,7	11,5	64,3	70,5
<b>San Carlos</b>						
<b>Promedio</b>	<b>9,3</b>	<b>37,6</b>	<b>47,0</b>	<b>32,2</b>	<b>130,7</b>	<b>162,9</b>
Mínimo	7,1	33,1	42,7	23,6	116,6	141,0
Máximo	11,2	42,1	53,1	39,4	151,7	180,4
λ	1,8	3,7	4,3	6,0	14,0	15,5
<b>Cauquenes</b>						
<b>Promedio</b>	<b>15,9</b>	<b>19,7</b>	<b>35,5</b>	<b>66,8</b>	<b>83,3</b>	<b>150,0</b>
Mínimo	2,3	1,4	8,1	9,6	4,4	38,6
Máximo	41,2	44,9	51,6	180,3	191,8	225,8
λ	15,4	19,6	17,2	65,4	82,6	73,9
<b>Quella</b>						
<b>Promedio</b>	<b>8,5</b>	<b>34,1</b>	<b>42,6</b>	<b>27,2</b>	<b>108,7</b>	<b>135,9</b>
Mínimo	6,3	5,7	17,8	20,4	18,0	56,1
Máximo	12,1	72,8	80,9	38,1	227,3	252,7
λ	2,0	22,3	21,2	6,2	69,6	65,9

<sup>1</sup>λ = Desviación estándar.

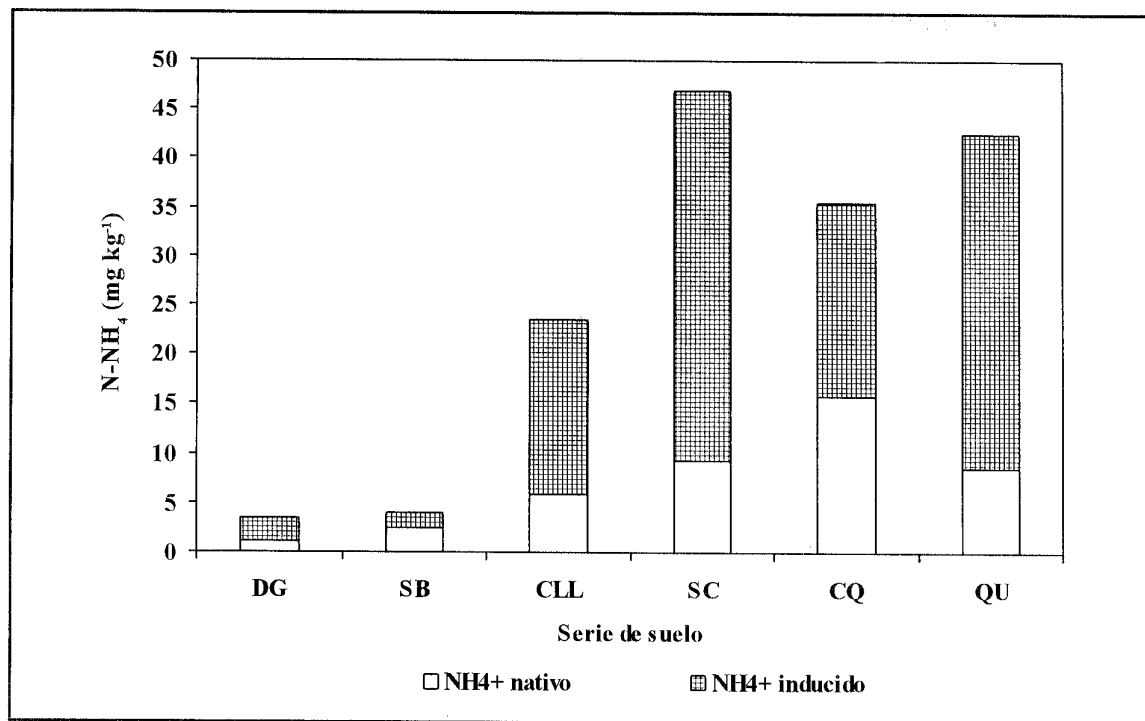


Figura 1. Valores promedio, por serie de suelo, de los contenidos de amonio nativo e inducido fijados. (DG: Diguillín; SB: Santa Bárbara; CLL: Collipulli; SC: San Carlos; CQ: Cauquenes; QU: Quella).

Figure 1. Mean values of the native and artificially fixed ammonium per soil series. (DG: Diguillín; SB: Santa Bárbara; CLL: Collipulli; SC: San Carlos; CQ: Cauquenes; QU: Quella).

### Relación entre la fijación de amonio y las propiedades del suelo

Solamente se analizaron los datos correspondientes a los suelos de las series no alofánicas. Se excluyeron los suelos alofánicos por presentar una nula o muy baja capacidad de fijación. El análisis de correlación simple (Cuadro 4) indicó que el contenido de  $\text{NH}_4^+$  nativo fijado sólo se asoció con el contenido de  $\text{NO}_3^-$  del suelo. Por otra parte, no hubo correlación con las capacidades de fijación inducida y total, lo que concuerda con lo encontrado por Sowden *et al.* (1978). La escasa correlación entre el  $\text{NH}_4^+$  nativo y las propiedades del suelo se atribuyen al hecho que la cantidad de  $\text{NH}_4^+$  nativo fijado se modifica, como se mencionó anteriormente, con el manejo al que ha estado sometido el suelo.

Las capacidades de fijación inducida y total se asociaron fuertemente entre sí y ambas con los cationes de intercambio Ca, Mg y Na y, además, con la CICE. Doram y Evans (1983) también encontraron una correlación positiva entre la capacidad de fijación inducida y la CICE. Estos cationes de intercambio son justamente los que provocan una expansión interlaminar de las capas de arcillas, promoviendo así el ingreso del  $\text{NH}_4^+$  a los espacios interlaminares y su fijación (Adams y Stevenson, 1964).

Dado que  $\text{NH}_4^+$  y K son fijados por las arcillas por el mismo mecanismo, ambos iones compiten por los lugares de fijación y el K tiene un efecto depresivo sobre la fijación de  $\text{NH}_4^+$  (Nõmmik, 1981). Cabe señalar, que ninguna de las fracciones de  $\text{NH}_4^+$  fijado se correlacionó significativamente con el contenido de K del suelo. Al

**Cuadro 4.** Coeficientes de correlación significativos ( $P \leq 0,05$ ) entre la cantidad de amonio nativo fijado, las capacidades de fijación inducida y total y las propiedades de las 24 muestras de suelos no alofónicos  
**Table 4.** Significant correlation coefficients ( $P \leq 0.05$ ) between the amount of fixed native ammonium, the artificial and total fixing capacities and the properties of the 24 samples of non-allophanic soils.

Características físico-químicas	Fijación nativa	Fijación inducida	Fijación total
pH	ns <sup>1</sup>	ns	ns
Materia orgánica	ns	ns	ns
N-NH <sub>4</sub> intercambio	ns	ns	ns
N-NO <sub>3</sub>	+ 0,429	ns	ns
N-total	ns	ns	ns
P-Olsen	ns	ns	ns
K intercambio	ns	ns	ns
Ca intercambio	ns	+ 0,505	+ 0,531
Mg intercambio	ns	+ 0,602	+ 0,549
Na intercambio	ns	+ 0,685	+ 0,629
Al intercambio	ns	ns	ns
CIC efectiva <sup>2</sup>	ns	+ 0,558	+ 0,541
Relación C/N	ns	ns	ns
Arena, %	ns	ns	ns
Limo, %	ns	ns	ns
Arcilla, %	ns	ns	ns
Densidad aparente	ns	ns	ns
Fijación nativa	—	ns	ns
Fijación artificial	—	—	+ 0,898
Fijación total	—	—	—

<sup>1</sup>ns = no significativo.

<sup>2</sup>CIC efectiva = Suma de bases + Al intercambio.

respecto, Lumbanraja y Evangelou (1994) señalaron que estos cationes, K y NH<sub>4</sub><sup>+</sup> no son como usualmente se cree, verdaderos análogos respecto a las reacciones de cambio en los suelos. Estos resultados sugieren que es muy difícil predecir el comportamiento de fijación del K o NH<sub>4</sub><sup>+</sup> en base a tamaño iónico y carga. En consecuencia, se requiere mayor experimentación para tener certezas sobre predicciones de intercambio o fijación en suelos con mineralogías y propiedades muy distintas.

En el Cuadro 5 se presentan los modelos que entregó el análisis de regresión múltiple. Toda la variación del contenido de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> fijado nativo es atribuible al contenido de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>; aunque esta variable explica sólo el 14% de la variación;

ninguna otra propiedad del suelo contribuyó significativamente a la regresión. La variación de la capacidad de fijación inducida de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> se explica, en un 64%, por los contenidos de Na de intercambio, limo y MO, mientras que el modelo que incluye Na, Ca y Al de intercambio, MO y relación C/N explica el 76% de la variación de la capacidad total de fijación de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>.

En estas dos últimas regresiones, el Na aparece como la variable de mayor peso, explicando el 47% de la variación de la fijación inducida y el 40% de la variación de la fijación total. Este efecto del Na seguramente se debe a que este catión presenta el mayor radio iónico hidratado de todos los cationes de intercambio y por lo tanto, produce una mayor expansión del espacio



**Cuadro 5.** Modelos de regresión múltiple que asocian las distintas fracciones de amonio fijado con las propiedades de las 24 muestras de suelos no alofánicos

**Table 5.** Multiple regression models that associate the different fixed ammonium fractions and the properties of the 24 samples of non-alophanic soils

Fracción NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> fijado	Modelo	R <sup>2</sup>	P
Nativo	$N-NH_4 = 7,48 + 0,38 N-NO_3$	0,147	0,04
Artificial	$N-NH_4 = -39,4 + 111,90 Na$ $+ 1,46 Limo - 3,11 MO$	0,638	< 0,01
Total	$N-NH_4 = 17,18 + 59,85 Na + 6,22 Ca$ $-13,14 Al - 45,14 MO$ $-1,31 C/N$	0,765	< 0,01

R<sup>2</sup>: coeficiente de determinación. P: probabilidad. MO: materia orgánica.

interlaminar de los cristales de arcillas expansibles.

El contenido de arcilla no presentó correlación significativa con las distintas fracciones de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> fijado ni integró los modelos de regresión múltiple. Este hecho, posiblemente se debe a que la fracción arcilla de las diferentes series de suelo está compuesta por proporciones distintas de minerales fijadores y minerales de bajo poder de fijación y, además, a que otras fracciones del suelo, tales como el limo y la arena pueden presentar algún grado de fijación (Kowalenko y Ross, 1980). En las series de suelos no alofánicos, el poder de fijación total (Figura 1) aparentemente se relaciona con el contenido de arcillas expansibles, excepto en la serie San Carlos que no presenta este tipo de arcillas, pero que contiene abundante feldespato (Cuadro 3), mineral que también participa en la fijación de NH<sub>4</sub> (Adams y Stevenson, 1964).

#### Disponibilidad del amonio fijado

El NH<sub>4</sub><sup>+</sup> nativo fijado se considera menos disponible que el NH<sub>4</sub> inducido fijado. Dependiendo de las características del suelo, de un 12-18% de la fracción nativa y de un 64-98% de la

fracción inducida del NH<sub>4</sub><sup>+</sup> fijado por el suelo pueden ser utilizados por las plantas, bacterias nitrificantes y/o microorganismos heterotróficos durante una estación de crecimiento (Kudeyarov, 1981; Mengel y Scherer, 1981; Liang y MacKenzie, 1994; Breitenbeck y Paramasivam, 1995; Steffens y Spark, 1997).

Considerando el valor máximo de disponibilidad anteriormente indicado (18%) y aplicándolo a las 36 muestras de suelos estudiados (Cuadro 6), el NH<sub>4</sub><sup>+</sup> nativo podría aportar de 0 a 32 kg N ha<sup>-1</sup>. El aporte es prácticamente nulo en los suelos alofánicos, no superando 2,3 kg N ha<sup>-1</sup>, con promedios de 0,5 en la serie Diguillín y de 0,9 kg N ha<sup>-1</sup> en la serie Santa Bárbara. En los suelos no alofánicos, la disponibilidad del NH<sub>4</sub><sup>+</sup> nativo fijado puede ser mayor, aunque baja, con promedios por serie de 3,7 a 12 kg N ha<sup>-1</sup>, correspondiendo el valor menor a la serie Collipulli y el valor mayor a la serie Cauquenes.

Basándose en estos valores posibles de disponibilidad, se puede inferir que el NH<sub>4</sub><sup>+</sup> nativo fijado en la estrata arable (0-25 cm) de los suelos analizados no juega un papel importante en la nutrición de los cultivos, especialmente en el caso de los suelos alofánicos.

**Cuadro 6.** Disponibilidad del amonio nativo fijado y del fijado en forma artificial, al aplicar los porcentajes máximos informados en la literatura\*

**Table 6.** Availability of native and artificially fixed ammonium, according to the maximum percentages reported in the literature

Serie de suelo		Amonio nativo fijado kg N ha <sup>-1</sup>	Amonio fijado artificialmente kg N ha <sup>-1</sup>
Diguillín	rango <b>promedio</b>	0,0 - 2,3 <b>0,5</b>	0,8 - 15,4 <b>6,0</b>
Santa Bárbara	rango <b>promedio</b>	0,0 - 2,3 <b>0,9</b>	0,2 - 7,1 <b>3,0</b>
Collipulli	rango <b>promedio</b>	1,8 - 7,1 <b>3,7</b>	3,9 - 143,2 <b>60,1</b>
San Carlos	rango <b>promedio</b>	4,2 - 7,1 <b>5,8</b>	115,4 - 150,2 <b>129,4</b>
Cauquenes	rango <b>promedio</b>	1,7 - 32,5 <b>12,0</b>	4,4 - 189,9 <b>82,6</b>
Quella	rango <b>promedio</b>	3,7 - 6,9 <b>4,9</b>	17,8 - 225,0 <b>107,6</b>

\*Amonio nativo fijado = 18% (Breitenbeck y Paramasivam, 1995).  
Amonio inducido fijado = 99% (Kowalenko y Ross, 1980).

En tanto, el NH<sub>4</sub><sup>+</sup> inducido fijado puede constituir una reserva del N proveniente de la mineralización de la MO o de los fertilizantes amoniacales (Liang y MacKenzie, 1994), que posteriormente será entregada en forma sostenida a los cultivos durante la etapa de crecimiento (Nõmmik, 1981; Baethgen y Alley, 1987). Por otra parte, la fijación inducida se puede considerar un mecanismo útil para reducir las pérdidas del N del suelo por lavado y desnitrificación (Nõmmik, 1981).

Si la capacidad de fijación de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> se saturara como consecuencia de la aplicación de fertilizantes amoniacales, la reserva útil, considerando una disponibilidad del 99%, del NH<sub>4</sub><sup>+</sup> inducido fijado sería de 0,2 a 225 kg ha<sup>-1</sup> en la estrata arable de los suelos analizados.

En los suelos alofánicos la cantidad de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> que puede oscilar entre las formas fijada y dis-

ponible debido a la fijación inducida sería de 0,2 a 15 kg N ha<sup>-1</sup>, valores muy bajos para que este fenómeno participe activamente en el ciclo del N en el suelo. En los suelos no alofánicos, la fijación inducida podría ciclar, en valores promedio por serie, de 60 a 129 kg N ha<sup>-1</sup> y participar activamente en la dinámica del NH<sub>4</sub><sup>+</sup> proveniente de la fertilización amoniacal o de la mineralización.

## CONCLUSIONES

Se encontraron bajas cantidades de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> nativo fijado, constituyendo esta fracción una baja proporción del N inorgánico y una proporción muy baja del N total de la estrata superficial de los suelos, especialmente en los suelos alofánicos. Esto indica que el NH<sub>4</sub><sup>+</sup> no intercambiable que contienen los suelos no contribuye significativamente al nitrógeno disponible y a la nutrición nitrogenada de los cultivos.

La capacidad de fijación inducida es muy baja en los suelos alofánicos y moderada en los suelos de las series no alofánicas. En estos últimos suelos, la fijación inducida puede jugar un papel relevante en la dinámica del  $\text{NH}_4^+$  proveniente de los fertilizantes amoniacales.

Aunque la fijación de  $\text{NH}_4^+$  no se asoció con el contenido de arcilla, el  $\text{NH}_4^+$  nativo fijado y las capacidades de fijación inducida y total fueron más altos en los suelos con mayor proporción

de arcillas 2:1 y feldespato. El alofán no participa en el proceso de fijación.

En los suelos no alofánicos, el contenido de  $\text{NH}_4^+$  nativo fijado solamente se asoció con el nitrato, mientras que las capacidades de fijación inducida y total se relacionaron principalmente con los cationes de intercambio, especialmente el Na, los cuales expanden la malla del cristal de arcillas 2:1.

### LITERATURA CITADA

- Adams Jr., R.S., and F.J. Stevenson. 1964. Ammonium absorption and release from rocks and minerals. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 16:345-351.
- Axley, J.H., and J.O. Legg. 1960. Ammonium fixation in soils and the influence of potassium on nitrogen availability from nitrate and ammonium sources. *Soil Sci.* 90:151-156.
- Baethgen, W.E., and M.M. Alley. 1987. Non-exchangeable ammonium nitrogen contribution to plant available nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51:110-115.
- Bajwa, M.I. 1982. Soil clay mineralogies in relation to fertility management: Effect of clay mineral types on ammonium fixation under conditions of wetland rice culture. *Agron. J.* 74:143-144.
- Besoain, E., M. González, y C. Sáez. 1984. Mineralogía de arcillas de algunos suelos de la zona central de Chile con exclusión de los suelos de cenizas volcánicas: origen, alteración, distribución. *Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. Boletín* Nº 4. p. 31-65.
- Besoain, E., M.A. Sadzawka, y G. Sepúlveda. 1987. Estados de alteración, minerales y propiedades de los suelos volcánicos. *Simiente* 57:49-64.
- Breitenbeck, G.A., and S. Paramasivam. 1995. Availability of  $^{15}\text{N}$ -labeled non-exchangeable ammonium to soil microorganisms. *Soil Sci.* 159:301-310.
- Chen, C.C., F.T. Turner, and J.B. Dixon. 1989. Ammonium fixation by high-charge smectite in selected Texas Gulf Coast soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53:1035-1040.
- Cox, A.E., B.C. Joern, and C.B. Roth. 1996. Non-exchangeable ammonium and potassium determination in soils with a modified sodium tetraphenylboron method. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60:114-120.
- Dalal, R.C. 1977. Fixed ammonium and carbon-nitrogen ratios of some Trinidad soils. *Soil Sci.* 124:323-327.
- Delgado, L.A. 1983. Incidencia de la cobertura vegetal sobre las propiedades, desarrollo y clasificación de perfiles graníticos del área de Florida VIII Región. 80 p. Tesis Ingeniero Agrónomo. Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía, Chillán, Chile.
- Doram, D.R., and L.J. Evans. 1983. Native fixed ammonium and fixation of added ammonium in relation to clay mineralogy in some Ontario soils. *Can. J. Soil Sci.* 63:631-639.
- Feigenbaum, S., A. Hadas, M. Sofer, and J.A. Molina. 1994. Clay-fixed labeled ammonium as a source of available nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:980-985.

- Guerra, O. 1973. Caracterización mineralógica de algunos suelos del área de regadío del embalse Coihueco, Chillán. 95 p. Tesis Ingeniero Agrónomo. Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía, Chillán, Chile.
- Keerthisinghe, G., K. Mengel, and S.K. Datta. 1984. The release of non-exchangeable ammonium ( $^{15}\text{N}$  labelled) in wetland rice soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:291-295.
- Kowalenko, C.G., and G.J. Ross. 1980. Studies on the dynamics of "recently" clay-fixed  $\text{NH}_4^+$  using  $^{15}\text{N}$ . *Can. J. Soil Sci.* 60:61-70.
- Kudeyarov, V.N. 1981. Mobility of fixed ammonium in soil. *Ecol. Bull. (Stockholm)* 33:281-290.
- Liang, B.C., and A.F. Mackenzie. 1994. Fertilization rates and clay fixed ammonium in two Quebec soils. *Plant and Soil* 163:103-109.
- Lumbanraja, J., and V.P. Evangelou. 1994. Adsorption-desorption of potassium and ammonium at low cation concentrations in three Kentucky subsoils. *Soil Sci.* 157:269-278.
- Marzadori, C., D. Scudellari, B. Maragoni, A. Simoni, L.V. Antisari, and C. Gessa. 1989. Season variation of interlayer ammonium in the soil of a peach orchard. *Acta Hort.* 383:35-46.
- Mengel, K., and H.W. Scherer. 1981. Release of non-exchangeable (fixed) soil ammonium under field conditions during the growing season. *Soil Sci.* 131:226-232.
- Nõmmik, H. 1981. Fixation and biological availability of ammonium in soil clay minerals. *Ecol. Bull. (Stockholm)* 33:273-279.
- Paramasivam S., and G.A. Breitenbeck. 1994. Distribution of nitrogen in soils of the Southern Mississippi River alluvial plain. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 25:247-267.
- Preston, C.M. 1982. The availability of residual fertilizer nitrogen immobilized as clay-fixed ammonium and organic N. *Can. J. Soil Sci.* 62:479-486.
- Silva, J.A., and J.M. Bremner. 1966. Determination and isotope-ratio analysis of different forms of nitrogen in soils: 5. Fixed ammonium. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 30:587-594.
- Smith, S.J., J.F. Power, and W.D. Kemper. 1994. Fixed ammonium and nitrogen availability indexes. *Soil Sci.* 158:132-140.
- Sowden, F.J., A.A. Mclean, and G.J. Ross. 1978. Native clay fixed ammonium content and fixation of added ammonium of some soils of Eastern Canada. *Can. J. Soil Sci.* 58:27-38.
- Steffens, D., and D.L. Sparks. 1997. Kinetics of non-exchangeable ammonium release from soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:455-461.
- Walsh, L.M., and J.T. Murdock. 1960. Native fixed ammonium and fixation of applied ammonium in several Wisconsin soils. *Soil Sci.* 89:183-193.
- Williamd, L.B., and R.E. Ferrel Jr. 1991. Ammonium substitution in illite during maturation of organic matter. *Clays and Clay Minerals* 39:400-408.