

# NITRIFICACIÓN DEL AMONIO A PARTIR DE UN FERTILIZANTE DE LIBERACIÓN CONTROLADA Y ÚREA CONVENCIONAL EN DOS SUELOS DE IOWA, EEUU

Marta Barrios<sup>1</sup>, Randy Killorn<sup>2</sup> y Judith García<sup>1</sup>

## RESUMEN

El retardo en la tasa de nitrificación del amonio es un factor importante a considerar para disminuir las pérdidas de fertilizantes aplicados al suelo. En este estudio se compararon los efectos de la urea ESN (liberación controlada) y la urea convencional, sobre la tasa de nitrificación en dos suelos (Harps y Nicollet) de Iowa, Estados Unidos, con diferencias en contenidos de carbono orgánico, pH y textura. Muestras de suelo fueron tratadas con una solución que contenía 1,942 o 2,913 g·L<sup>-1</sup> de urea (dosis 200 o 300 kg·ha<sup>-1</sup>, respectivamente) y se llevó el suelo a 25, 50, 75 o 100 % de su capacidad de retención de humedad. Posteriormente, los suelos fueron incubados durante 0, 7, 15, 30, 45 o 60 días. Al final de la incubación, los contenidos fueron extraídos con una solución de KCl 2M y el extracto fue analizado para N-(NO<sub>3</sub><sup>-</sup> + NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) y N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Se calcularon las tasas de nitrificación y se realizaron análisis de regresión y determinación de puntos críticos. Se encontró que la aplicación de ESN disminuyó la tasa máxima de nitrificación e incrementó el período de nitrificación. Las concentraciones más altas de nitrato se obtuvieron en Harps, a un contenido intermedio de humedad, en comparación con Nicollet y los tratamientos con urea convencional.

**Palabras clave adicionales:** ESN, nitratos, nitrógeno amoniacal, tasa de nitrificación

## ABSTRACT

### **Nitrification of ammonium nitrogen from a controlled release fertilizer and conventional urea in two soils of Iowa, USA**

Retardation of ammonium nitrification rate is one of the most important factors to consider for reducing losses of fertilizer applied to soils. In this study, we compared the effects of ESN urea and conventional urea on nitrification rates in two soils (Harps and Nicollet), Iowa State, USA, varying in organic carbon content, pH and texture. Samples of soil were treated with solution containing 1,942 or 2,913 g·L<sup>-1</sup> urea (200 or 300 kg·ha<sup>-1</sup>, respectively) and brought to 25, 50, 75 and 100 % of their water holding capacity. Then, soils were incubated for 0, 7, 15, 30, 45 or 60 days. At the end of the incubation, the contents were extracted with 2M KCl solution and the extract was analyzed for (NO<sub>3</sub><sup>-</sup> + NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)-N and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N. Nitrification rates were calculated, and regression analysis and determination of critical points were performed. The results showed a reduction of the maximum nitrification rate and an extended nitrification period in soils treated with ESN. The highest nitrate concentration was found in Harps, at medium moisture content, as compared to Nicollet and treatments with conventional urea.

**Additional key words:** ESN, nitrates, nitrogen, nitrification rate

## INTRODUCCIÓN

Las formas amoniacales aplicadas al suelo a través de los fertilizantes son rápidamente transformadas a nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Este proceso de transformación del nitrógeno es llevado a cabo principalmente por bacterias nitrificantes, las cuales obtienen la energía para sus actividades metabólicas a partir de la nitrificación (Kponblekau-A y Killorn, 1996). El NO<sub>3</sub><sup>-</sup> producido y que no es absorbido por la planta puede perderse en el suelo tanto por desnitrificación, como por reducción

desasimilatoria (reducción a NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), transporte superficial (escorrentía) o por lixiviación (Paul y Clark, 1989).

Las dos formas de pérdida más importantes de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> son la desnitrificación y la lixiviación, y esto conduce a pérdidas económicas para el productor y problemas de contaminación debido al lavado a través del perfil de suelo (Sharifi et al., 2007; Sainz-Rozas et al., 2008). Actualmente la búsqueda de nuevas tecnologías que permitan hacer un uso más eficiente del nitrógeno y disminuir las pérdidas ha conducido al estudio de nuevos materiales capaces de

Recibido: Octubre 30, 2009

Aceptado: Julio 20, 2010

<sup>1</sup> Instituto de Agronomía, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Apdo. 2101. Maracay. Venezuela. e-mail: barriosm@agr.ucv.ve; garciaj@agr.ucv.ve

<sup>2</sup> 3208 Agronomy Hall, Iowa State University. Ames, IA 50011USA. e-mail: rkillorn@iastate.edu

mejorar su eficiencia de uso a través de la sincronización del N aportado con los requerimientos del cultivo (Grant, 2006).

Estos fertilizantes de liberación lenta o controlada como la urea ESN (environmentally smart nitrogen) (Dowbenko, 2007) disminuyen, además, las cantidades de N contaminante ya que los mismos están encapsulados en una cubierta constituida por un polímero especial. Y la mayor eficiencia en el uso del N posibilita un mejor aprovechamiento del fertilizante en términos de beneficio económico, ya que permite reducir la dosis de N aplicado.

Los objetivos del estudio fueron: i) evaluar la urea ESN como fertilizante de liberación controlada en comparación a la urea convencional, ii) calcular la máxima concentración de N en función del tipo de suelo, contenido de humedad y tiempo de incubación del suelo, y iii)

evaluar los efectos de la dosis de urea, tipo de suelo, humedad y tiempo de incubación, sobre la dinámica de la nitrificación en el suelo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los suelos utilizados en el experimento fueron obtenidos en campos maiceros ubicados en Story County, Iowa, USA, en el año 2005, y correspondieron a las series Nicollet y Harps. Las características de estos suelos son mostradas en el Cuadro 1. El pH fue determinado en una suspensión suelo:agua 1:2,5. El carbono orgánico fue determinado por el método de Mebius (1960) y el N total por el procedimiento semi-micro Kjeldahl para determinaciones colorimétricas de N (Hach, 1988). La distribución del tamaño de partículas fue determinada por el método de la pipeta.

**Cuadro 1.** Características texturales y químicas de los suelos estudiados (0-15 cm)

| Tipo de Suelo |                   | Arcilla            | Arena | pH                 | C        |                     | N inorgánico                 |                              |
|---------------|-------------------|--------------------|-------|--------------------|----------|---------------------|------------------------------|------------------------------|
| Serie         | Subgrupo          |                    |       |                    | orgánico | total               | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> |
|               |                   | g·kg <sup>-1</sup> |       | g·kg <sup>-1</sup> |          | mg·kg <sup>-1</sup> |                              |                              |
| Nicollet      | Aquic Haplaquoll  | 254                | 325   | 5,1                | 26,0     | 1,44                | 3,09                         | 4,48                         |
| Harps         | Typic Calciaquoll | 264                | 386   | 7,6                | 37,0     | 2,16                | 1,17                         | 6,11                         |

Para las evaluaciones de las ureas ESN y convencional, las muestras de suelo fueron tomadas a una profundidad de 0-15 cm, secadas a temperatura ambiente, trituradas y pasadas a través de un tamiz de 2 mm. Luego se tomaron alícuotas de 10 g de suelo que se colocaron en botellas de vidrio de 118 mL de capacidad. A los tratamientos con ESN (urea recubierta) o urea convencional (no recubierta) se le añadió al suelo 1 mL de una solución que contenía 1,94 o 2,91 g·L<sup>-1</sup> de urea, equivalente a dosis de 200 (D1) o 300 (D2) kg·ha<sup>-1</sup> de urea, respectivamente. Asimismo, se añadió agua desionizada para llevar el suelo a 25%, 50%, 75% y 100 % de su capacidad de retención de humedad. Posteriormente, las botellas fueron cubiertas con una membrana plástica (parafilm) perforada para permitir la aireación del suelo. Luego fueron sometidas a incubación a 20±1 °C durante 0, 7, 15, 30, 45 y 60 días. La cantidad de agua perdida fue medida semanalmente en forma gravimétrica, reemplazándola si las pérdidas excedían 1 g.

Al final de la incubación, los contenidos de cada botella fueron extraídos con 50 mL de KCl 2M. Después de 1 hora, la suspensión fue filtrada a través de papel de filtro Whatman 1. El extracto fue analizado para N-(NO<sub>3</sub><sup>-</sup> + NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) y

N-(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), utilizando un analizador de iones Lachat, mod. QuickChem AE (Milwaukee, WI).

Las tasas de nitrificación fueron calculadas utilizando los valores obtenidos de las determinaciones de laboratorio en este experimento y en otro experimento anterior, e incorporados en la siguiente fórmula (Sahrawat, 1980):

$$\% = \frac{[(NO_3 + NO_2) - N]}{[(NO_3 + NO_2 + NH_4) - N]} \times 100$$

Todos los análisis se realizaron por duplicado en cada ensayo y los resultados se representan gráficamente en función del tiempo de incubación y contenido de humedad, para cada tipo de urea y dosis aplicada. Se realizó análisis de regresión y se determinaron los puntos críticos en las ecuaciones generadas tanto para NH<sub>4</sub><sup>+</sup> como para NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

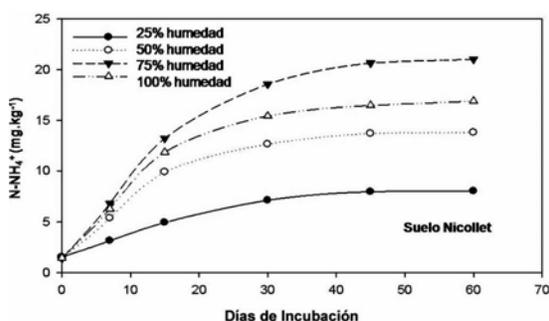
### Concentraciones de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>

Existió una tendencia a mayor liberación de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> a mayores contenidos de humedad en el suelo tanto para Nicollet como para Harps sin fertilizar (D0) (Figuras 1 y 2), indicando que la liberación de amonio es más lenta cuando el suelo está más seco. Grant (2006) encontró que

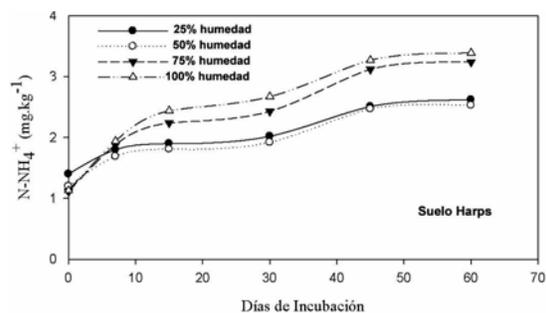
al utilizar ESN se incrementó la acumulación de N en el suelo húmedo, pero hubo mucha menos efectividad bajo condiciones de suelo seco.

Se observan concentraciones muy bajas (menos de  $25 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) en D0 en comparación a los tratamientos fertilizados (Figuras 1 a 6), y una tendencia a equilibrarse después de 45 días de incubación (ddi) del suelo.

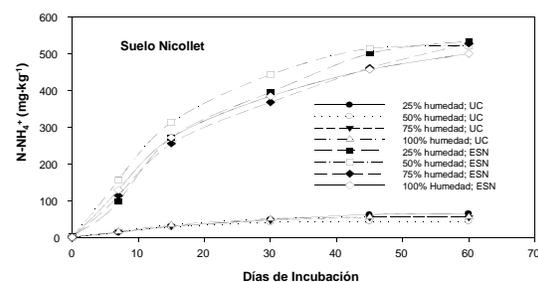
En presencia del fertilizante, a las dos dosis aplicadas, no hubo diferencias significativas con respecto al contenido de humedad en el suelo y la liberación de amonio pero sí con respecto a las dos fuentes de nitrógeno, tanto en Nicollet como en Harps. La acumulación de amonio en Nicollet alcanzó valores máximos aproximados de 400 y  $900 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  a la menor y mayor dosis de ESN, respectivamente (Figuras 2 y 3), mientras que para la urea convencional la acumulación no alcanzó  $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  con ninguna de las dosis, aunque fue ligeramente mayor ante la dosis más alta. Para el suelo Harps la tendencia fue la misma (Figuras 5 y 6), aunque las cantidades de amonio acumuladas fueron menores que en Nicollet. Las concentraciones de amonio en los tratamientos con urea convencional fueron casi constantes y menores con respecto a ESN en ambos suelos (especialmente en Harps por su elevado pH). Esto se atribuye al hecho de que el amonio se pierde muy rápidamente por volatilización de amoníaco una vez que ha ocurrido la nitrificación aerobia, se puede también lavar o inclusive convertirse nuevamente a nitratos (desasimilación) y desnitrificarse (Paul y Clark, 1989); la urea convencional es un material higroscópico que favorece las pérdidas por volatilización las cuales ocurren mucho más rápidamente que con un fertilizante de liberación lenta como el ESN.



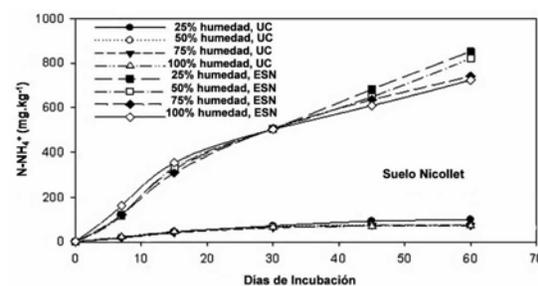
**Figura 1.** Dinámica del  $\text{N-NH}_4^+$  en el suelo Nicollet sin fertilizante a diferentes contenidos de humedad



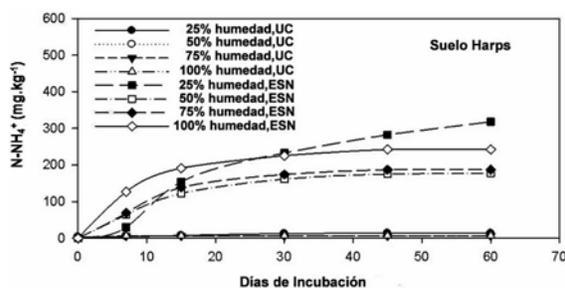
**Figura 2.** Dinámica del  $\text{N-NH}_4^+$  en el suelo Harps sin fertilizante a diferentes contenidos de humedad



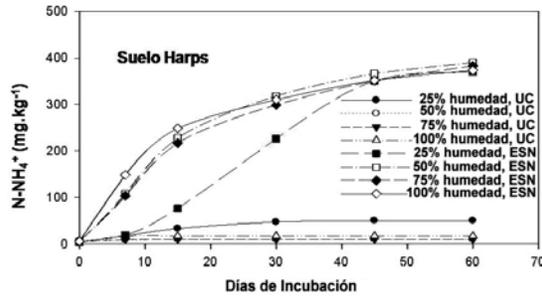
**Figura 3.** Dinámica del  $\text{N-NH}_4^+$  en el suelo Nicollet con fertilizante ( $200 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) a diferentes contenidos de humedad



**Figura 4.** Dinámica del  $\text{N-NH}_4^+$  en el suelo Nicollet con fertilizante ( $300 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) a diferentes contenidos de humedad



**Figura 5.** Dinámica del  $\text{N-NH}_4^+$  en el suelo Harps con fertilizante ( $200 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) a diferentes contenidos de humedad



**Figura 6.** Dinámica del  $N-NH_4^+$  en el suelo Harps con fertilizante ( $300 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) a diferentes contenidos de humedad

1. Nicollet (ESN)

$$\hat{y} = -38,12 + 5,13Di + 0,45Do + 0,19H - 0,08Di^2 + 0,004Do * Di - 0,0002Do^2 - 0,011H * Di - 0,001H * Do + 0,0005H^2$$

2. Nicollet (Urea Convencional)

$$\hat{y} = -4,22 + 0,87Di + 0,05Do - 0,02H - 0,01Di^2 - 0,001Do * Di + 0,00002Do^2 - 0,0013H * Di - 0,0002H * Do + 0,0008H^2$$

3. Harps (ESN)

$$\hat{y} = -23,08 + 3,47Di + 0,17Do - 0,27H - 0,04Di^2 - 0,0001Do * Di + 0,0002Do^2 - 0,015H * Di - 0,0005H * Do + 0,005H^2$$

4. Harps (Urea Convencional)

$$\hat{y} = 4,13 - 0,017Di + 0,01Do - 0,14H + 0,001Di^2 - 0,0003Do * Di + 0,00006Do^2 + 0,00005H * Di - 0,0002H * Do + 0,001H^2$$

**Cuadro 2.** Puntos críticos para la concentración de amonio en función de la dosis, días de incubación y contenido de humedad en el suelo, según modelos cuadráticos

| Suelo/Fertilizante            | Dosis ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) | Tiempo (días) | Humedad (%) | Valor máximo de $NH_4^+$ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | $R^2$ (%) | CV (%) |
|-------------------------------|--|---------------|-------------|---|-----------|--------|
| (1) Nicollet/ESN              | 293                                      | 34,2          | 52          | 174,6   | 73,4      | 51,4   |
| (2)Nicollet/Urea Convencional | 291                                      | 27,8          | 50          | 19,7  | 69,6      | 62,5   |
| (3) Harps/ESN                 | 295                                      | 29,5          | 53          | 82,9  | 57,2      | 86,2   |
| (4)Harps/Urea Convencional    | 256                                      | 17,6          | 41          | 3,3   | 51,4      | 135,3  |

Al evaluar los tratamientos en función de cada modelo, se encontró que en Nicollet/ESN se obtuvo un punto de silla, y el análisis de estimadores de cresta originó una respuesta máxima de  $174,6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  a los 34,2 ddi, a una dosis de  $293 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  de ESN y a una humedad del 52 % (Cuadro 2). El análisis, realizado en forma similar para los otros tres tratamientos, permitió detectar que el período de nitrificación fue más extendido cuando se utilizó urea ESN (Cuadro 2).

### Tiempo de incubación

Se observó en las Figuras 1, 3 y 4 que las concentraciones de amonio en el suelo Nicollet, aumentan hasta los 60 ddi, independientemente de la dosis de fertilizante aplicada; es probable que esto se relacione con los mayores contenidos originales de  $N-NH_4^+$  de este suelo. En Harps las mayores concentraciones de amonio estuvieron más afectadas por el

Resultados similares fueron encontrados por Barbieri et al. (2003) en un suelo de elevado pH, en el que la volatilización de amoníaco resultó ser un importante mecanismo de pérdida de N, y donde esta última estuvo además influenciada por la dosis aplicada. Las mayores concentraciones de amonio en Nicollet con respecto a Harps indican que la liberación ocurrió más lentamente a lo largo del período de incubación.

En los análisis de regresión se obtuvieron los siguientes modelos cuadráticos que explican la cantidad de amonio liberada en función de la dosis, días de incubación y contenido de humedad en el suelo:

contenido de humedad, lográndose éstas a valores más bajos de agua en el suelo; las curvas sugieren un período máximo de nitrificación a medida que aumenta la población de organismos nitrificantes, que se corresponde con una disminución del amonio debido a una mayor tasa de conversión de esta forma a nitratos.

En el testigo (D0) la concentración de  $NH_4^+$  en el suelo tiende igualmente a aumentar hasta 60 ddi en ambos suelos, aun cuando las cantidades de amonio son más bajas en comparación a los tratamientos con fertilizante; es probable que las pérdidas de  $N-NH_3$  se favorezcan con la circulación de aire en los frascos de incubación y por el pH del suelo. Nicollet tuvo mayores concentraciones de  $N-NH_4^+$  que Harps, probablemente debido a las pérdidas de N como  $NH_3$ . La liberación en el tiempo de  $N-NH_4^+$  en ambos suelos fue más lenta cuando el suelo estuvo más seco, aunque

fue más evidente en Harps. En general, no hubo diferencias significativas entre el contenido de humedad del suelo y la concentración de amonio en la D0; para este tratamiento hubo diferencias más marcadas entre fertilizantes y entre suelos.

### Concentraciones de $\text{NO}_3^-$

Las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  aumentaron tanto en Nicollet como en Harps al aumentar la dosis de N (Figuras 8, 9, 11 y 12). En Harps, las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  tendieron a ser mayores que las de  $\text{NH}_4^+$ . Ferguson et al. (2002) encontraron que las mayores pérdidas por volatilización de N se corresponden con pHs por encima de 7. En Harps, con pH de 7,6 las pérdidas por volatilización serían mayores y de allí, las menores concentraciones de  $\text{NH}_4^+$  con respecto al  $\text{NO}_3^-$ . En el tratamiento sin fertilizante (D0) la concentración de  $\text{NO}_3^-$  fue muy baja a contenidos de humedad entre 75 y 100 % en ambos suelos (Figuras 7 y 10).

Existieron diferencias significativas en la liberación de  $\text{NO}_3^-$  en Harps para ambas fuentes nitrogenadas, especialmente a la dosis de 300  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  (D2). Las cantidades de nitrato en D0 fueron mucho menores en comparación a los tratamientos con fertilizante (Figura 10).

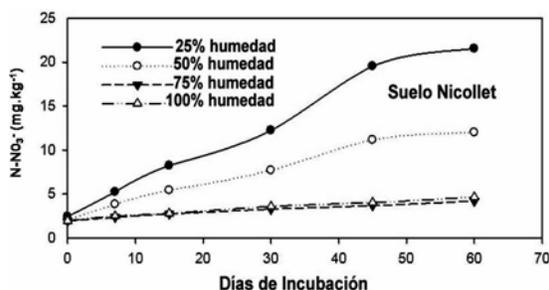


Figura 7. Dinámica del  $\text{N-NO}_3^-$  en el suelo Nicollet sin fertilizante a diferentes contenidos de humedad

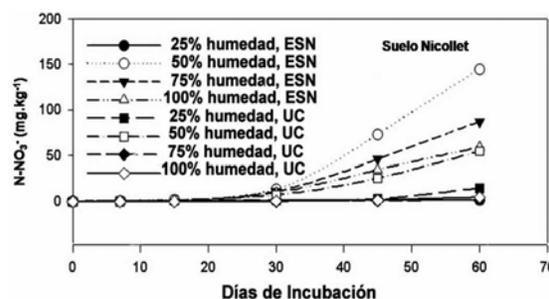


Figura 8. Dinámica del  $\text{N-NO}_3^-$  en el suelo Nicollet con fertilizante ( $200 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) a diferentes contenidos de humedad

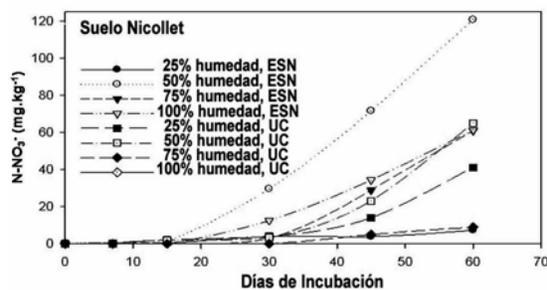


Figura 9. Dinámica del  $\text{N-NO}_3^-$  en el suelo Nicollet con fertilizante ( $300 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) a diferentes contenidos de humedad

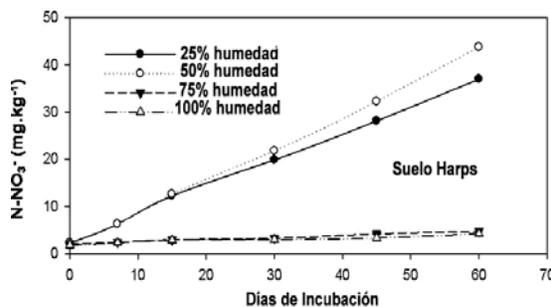


Figura 10. Dinámica del  $\text{N-NO}_3^-$  en el suelo Harps sin fertilizante a diferentes contenidos de humedad

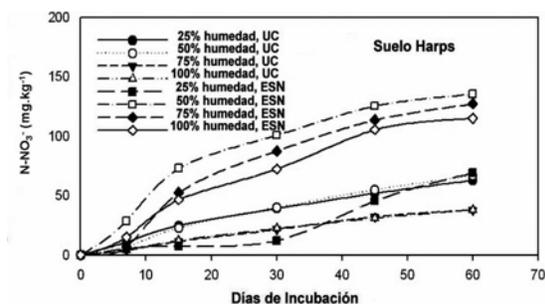


Figura 11. Dinámica del  $\text{N-NO}_3^-$  en el suelo Harps con fertilizante ( $200 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) a diferentes contenidos de humedad

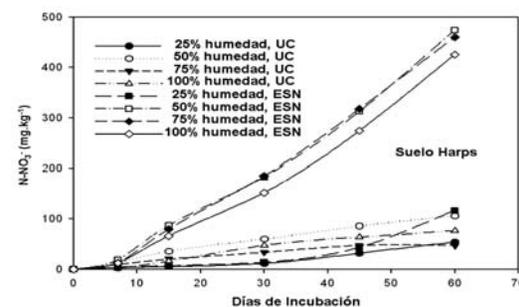


Figura 12. Dinámica del  $\text{N-NO}_3^-$  en el suelo Harps con fertilizante ( $300 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) a diferentes contenidos de humedad

En los análisis de regresión se obtuvieron los siguientes modelos que explican la cantidad de

nitratos en función de la dosis, días de incubación y contenido de humedad en el suelo:

1. Nicollet (ESN)

$$\hat{y} = -11,83 - 0,27Di + 0,02Do + 0,67H + 0,003Di^2 + 0,001Do * Di - 0,00002Do^2 + 0,0024H * Di + 0,0003H * Do - 0,001H^2$$

2. Nicollet (Urea convencional)

$$\hat{y} = 3,83 - 0,01Di - 0,04Do + 0,001H + 0,002Di^2 + 0,0006Do * Di + 0,00008Do^2 - 0,002H * Di + 0,0001H * Do - 0,0001H^2$$

3. Harps (ESN)

$$\hat{y} = -37,59 + 0,22Di + 0,05Do + 1,79H - 0,01Di^2 + 0,007Do * Di - 0,0006Do^2 + 0,008H * Di + 0,002H * Do - 0,016H^2$$

4. Harps (Urea convencional)

$$\hat{y} = 1,14 + 0,62Di - 0,006Do + 0,01H - 0,007Di^2 + 0,0004Do * Di + 0,000004Do^2 - 0,002H * Di + 0,0002H * Do - 0,0005H^2$$

**Cuadro 3.** Puntos críticos para la concentración de nitratos en función de la dosis, tiempo de incubación y contenido de humedad en el suelo, según modelos cuadráticos

| Suelo/Fertilizante             | Dosis (kg·ha <sup>-1</sup> ) | Tiempo (días) | Humedad (%) | Valor máximo de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg·kg <sup>-1</sup> ) | R <sup>2</sup> (%) | CV (%) |
|--------------------------------|------------------------------|---------------|-------------|---|--------------------|--------|
| (1) Nicollet/ESN               | 213                          | 56,98         | 67          | 33,10   | 58,90              | 129,15 |
| (2) Nicollet/Urea convencional | 220                          | 54,60         | 50          | 8,61  | 69,92              | 95,49  |
| (3) Harps/ESN                  | 245                          | 52,10         | 71          | 129,04  | 89,92              | 41,98  |
| (4) Harps/Urea convencional    | 277                          | 40,64         | 48          | 17,06   | 66,90              | 54,13  |

Al evaluar los tratamientos en función de cada modelo (Cuadro 3), y aplicando el análisis de estimadores de cresta, se obtuvo una respuesta máxima donde la mayor concentración de nitratos ocurrió entre 67 a 71% de humedad en el suelo, valores que están dentro del rango para una máxima actividad microbiana y mayores niveles de oxígeno (FAO-IFA, 2004). Grant (2006) encontró también que el uso de urea ESN incrementó la acumulación de N en el suelo bajo condiciones de humedad pero fue mucho menos efectivo bajo condiciones de suelo seco. Al comparar los cuatro tratamientos se observa que el período para la máxima concentración de nitratos fue más extendido en el suelo Nicollet.

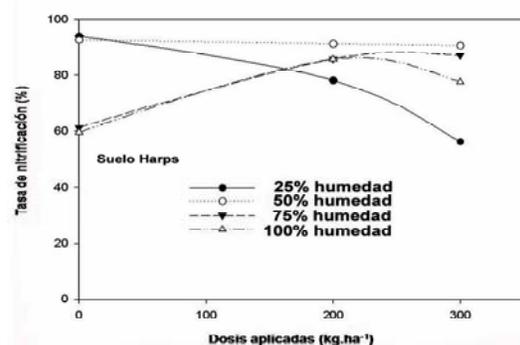
En general, las concentraciones de amonio fueron mucho más bajas en los tratamientos con urea convencional en comparación a los tratamientos con ESN (Figuras 3, 4, 5 y 6); esto indicaría que la liberación de N ocurrió mucho más rápidamente en los primeros y pudo perderse por volatilización y desnitrificación, y que la utilización de fuentes nitrogenadas de liberación controlada como el ESN, favorece el retardo de la oxidación biológica del amonio y por tanto, se disminuyen las pérdidas de nitrógeno. Se observa en las figuras que, tanto a la dosis D1 como a la D2, a mayores contenidos de humedad en ambos suelos se alcanza la máxima liberación de N en menor número de días en comparación a cuando los suelos tienen contenidos menores de humedad. Las

concentraciones de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> fueron más bajas en ambos suelos, tanto a la dosis D1 como a la D2, a contenidos de humedad superiores al 25 % (Figuras 8, 9, 11 y 12); esto probablemente debido al hecho de que la desnitrificación ocurre más rápidamente a mayores contenidos de humedad en el suelo (Mora et al., 2007). Se aprecia en Harps, una tendencia a disminuir las concentraciones a partir de 20-40 ddi. En Nicollet, con menor contenido de nitratos que Harps, las concentraciones son menores y el comportamiento del NO<sub>3</sub><sup>-</sup> es más variable en función del contenido de humedad del suelo (Figuras 8 y 9). Hasta los 30 ddi las concentraciones son muy bajas a todos los contenidos de humedad en el suelo, con excepción de 50% en la D1. Se aprecia que a partir de los 30 ddi hay un aumento de las concentraciones, especialmente a la dosis mayor (D2) en este suelo. En el testigo (D0) se observan mayores contenidos de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (en ambos suelos) a los menores contenidos de humedad. Esta tendencia del NO<sub>3</sub><sup>-</sup> a disminuir a mayor contenido de humedad debe estar relacionada con la correlación negativa existente entre la nitrificación bruta y el aumento de la tasa de espacio poroso lleno de agua, debido a que el proceso de oxidación de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> a N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> es llevado a cabo por bacterias de los géneros *Nitrosomonas* y *Nitrobacter*, las cuales son más activas en condiciones aerobias y no producen nitratos en ausencia de oxígeno molecular (Paul y Clark, 1989). La nitrificación

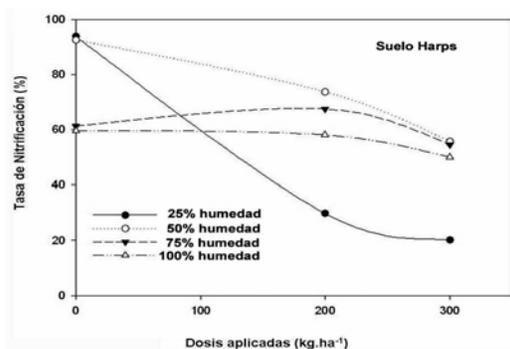
es controlada principalmente por la concentración de amonio y oxígeno, el cual a su vez, es moderado por la humedad del suelo. Resultados similares fueron encontrados por Videla et al. (2005).

### Tasa de nitrificación

En las Figuras 13 (a, b) y 14 (a, b) se observa que en los dos suelos tratados con ESN la tasa de nitrificación disminuyó con el incremento de la dosis de fertilizante en comparación con la urea convencional, lo cual es más evidente en Harps que en Nicollet. Resultados similares fueron obtenidos por Kpombrekou y Killorn (1996) al utilizar un inhibidor de la nitrificación. Se observa también una tendencia del contenido de humedad a influir sobre la tasa de nitrificación, tanto a 25 como a 100 % de la capacidad de retención de agua de estos suelos, es decir, el proceso estaría afectado por la ausencia de microorganismos nitrificantes debido a déficit o exceso de humedad. Se ha encontrado que la actividad microbiana alcanza un máximo cuando existe entre 30 y 60 % lleno de humedad volumétrica (FAO-IFA, 2004).

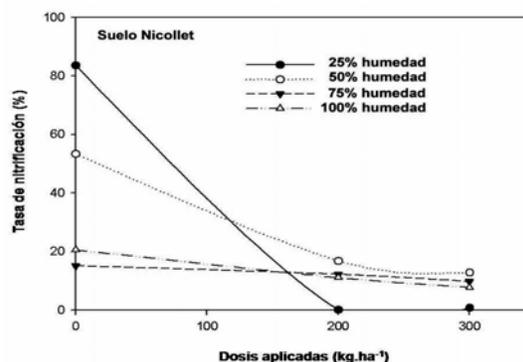


**Figura 13a.** Tasas de nitrificación en el suelo Harps, fertilizado con urea convencional, a diferentes contenidos de humedad

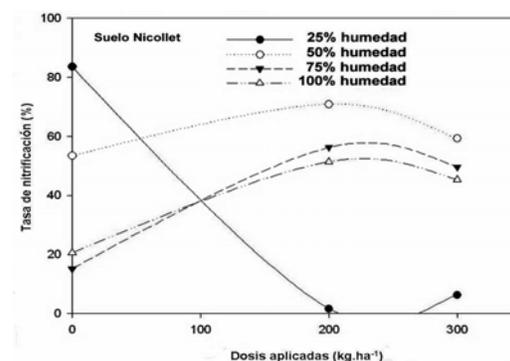


**Figura 13b.** Tasas de nitrificación en el suelo Harps, fertilizado con ESN, a diferentes contenidos de humedad

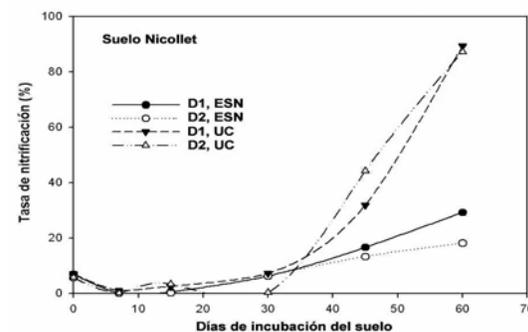
En las Figuras 15 (a, b) se observa que la tasa de nitrificación en Nicollet es menor en los tratamientos con ESN en comparación a los tratamientos con urea convencional, lo que indica que la nitrificación en los primeros es controlada y puede prolongarse por más tiempo. Similares resultados se observaron en Harps.



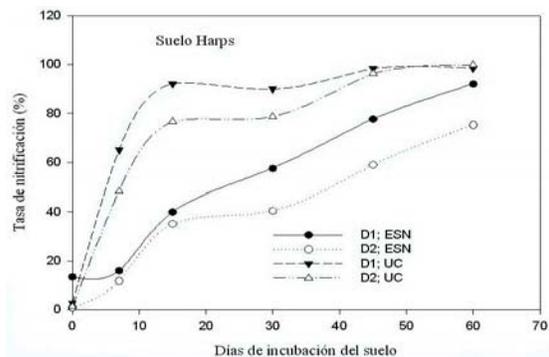
**Figura 14a.** Tasas de nitrificación en el suelo Nicollet, fertilizado con ESN, a diferentes contenidos de humedad



**Figura 14b.** Tasas de nitrificación en el suelo Nicollet, fertilizado con urea convencional, a diferentes contenidos de humedad



**Figura 15a.** Tasas de nitrificación en el suelo Nicollet, a diferentes días de incubación



**Figura 15b.** Tasas de nitrificación en el suelo Harps, a diferentes días de incubación

### CONCLUSIONES

El  $\text{NH}_4^+$  se liberó más lentamente a menores contenidos de humedad (25%) en el suelo fertilizado con ESN (tanto a la dosis de 200 como a 300  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ). Aun cuando se observó una mayor acumulación de N, la efectividad de ESN bajo condiciones de baja humedad en el suelo, fue menor. La nitrificación del amonio producido se puede reducir considerablemente con la aplicación de fertilizantes nitrogenados de liberación lenta o controlada, como el ESN. El uso de ESN permitió además una reducción importante de la tasa máxima de nitrificación en los suelos analizados y una extensión del período de nitrificación en los mismos.

### LITERATURA CITADA

- Barbieri, P., H. Echeverría y H. Sainz Rozas. 2003. Respuesta del cultivo de maíz irrigado al agregado de macronutrientes y Zinc y su concentración en planta en Balcarce. Revista de Investigaciones Agropecuarias (RIA) 32(2): 97-112.
- Dowbenko, R.E. 2007. New fertility product-ESN: Controlled-release nitrogen for enhanced nitrogen efficiency and improved environmental safety. Agrium Advance Technologies Inc. Annual Report. 10 p.
- FAO-IFA. 2004. Estimaciones globales de las emisiones gaseosas de  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}$  y  $\text{N}_2\text{O}$  provenientes de las tierras agrícolas. FAO. Roma. 121 p.
- Ferguson, R.B., G.W. Hergert, J.S. Schepers, C.A. Gotway, J.E. Cahoon y T.A. Peterson. 2002. Site-specific nitrogen management of irrigated maize: yield and soil residual nitrate effects. Soil Sci. Soc. Am. J. 66: 544-553.
- Grant, C. 2006. Agricultural management of enhanced efficiency fertilizer. Symp. Use of Enhanced Efficiency Fertilizers for Improved Agricultural Nutrient Management. ASA-CSSA-SSSA. Indianapolis, IN. 13 p.
- Hach. 1988. Soil testing with common regional extractants N° 3202. Colorimetric nesslerization method. Hach Company. Ames, IA. pp. 58-60.
- Kpombrekai-A., K. y R. Killorn. 1996. Nitrification of ammonium nitrogen in soils treated with XDE-474. Soil Sci. Soc. Am. J. 60: 1482-1489.
- Mebius, L.T. 1960. A rapid method for determination of organic carbon in soil. Anal. Chim. Acta 22: 120-124.
- Mora, S., F. Gavi, J. Peña, L. Tijerina y H. Vaquera. 2007. Desnitrificación de un fertilizante de lenta liberación y úrea+fosfato monoamónico aplicados a trigo irrigado con agua residual o de pozo. Rev. Int. Ambient 23 (1): 25-33.
- Paul, E.A. y F.E. Clark. 1989. Soil Microbiology and Biochemistry. Academic Press. New York.
- Sahrawat, K.L. 1980. On the criteria for comparing the ability of compounds for retardation of nitrification in soil. Plant and Soil 55: 487-490.
- Sainz Rozas, H., A. Calviño, H. Echeverría, P. Barbieri y M. Redolatti. 2008. Contribution of anaerobically mineralized nitrogen to the reliability of planting or presidedress soil N test in maize. Agron. J. 100: 1020-1025.
- Sharifi, M., B.J. Zebarth. D. Burton, C.A. Grant y J.M. Cooper. 2007. Evaluation of some indices of potentially mineralizable nitrogen in soil. Soil Science Society of American Journal 71: 1233-1239.
- Videla, C., A. Pazos, P.C. Triveli, H. Echeverría y G.A. Studdert. 2005. Mineralización bruta de nitrógeno bajo labranza convencional, siembra directa y pastura. CI Suelo 23 (2): 133-144.