

RELACIONES ENTRE LA TASA DE DESNITRIFICACION Y EL CONTENIDO DE NITRATOS, HUMEDAD Y CARBONO ORGANICO SOLUBLE DEL SUELO EN UN CULTIVO DE TRIGO

L. PICONE, C. VIDELA

Unidad Integrada INTA - FCA Balcarce CC 276 (7620) Balcarce, Argentina

RELATIONSHIPS BETWEEN DENITRIFICATION RATE AND NITRATE, WATER CONTENT AND SOLUBLE ORGANIC CARBON IN SOIL UNDER WHEAT

A field study was performed to evaluate the effect of two nitrogen rates (0 and 120 kg N ha⁻¹ as urea) on denitrification in a soil cropped with wheat, under conventional tillage. Nitrate, soluble organic carbon and water content were measured in order to identify the main control factor. Denitrification rate measured by the acetylene inhibition technique, using undisturbed cores, varied through the growing season following the changes in soil water content, but in general was small and averaged 1.06 µg N-N₂O kg⁻¹ soil h⁻¹. Fertilized plots had significantly higher denitrification rate than the controls on August and October. The maximum denitrification rate of 4.41 and 1.54 µg N-N₂O kg⁻¹ soil h⁻¹ occurred on August in fertilized and unfertilized plots, respectively, and it was associated with the highest water and nitrate content. Significant correlation was observed between denitrification rate and nitrate content (r=0.58), but it was related negatively to soluble organic carbon (r=-0.63). Water content seems to be the most important regulator of denitrification, showing a critical value of 0.43 cm cm⁻³ soil (unfertilized plots) and 0.32 cm cm⁻³ soil (fertilized plots), above these values nitrogen losses increased.

Key words : Denitrification - Soluble organic carbon - Wheat - Soil moisture -Nitrate

INTRODUCCION

La práctica de la fertilización nitrogenada del cultivo de trigo ha aumentado en los últimos años (SAG y P 1995) y con ello ha surgido la necesidad de conocer la eficiencia de utilización de los fertilizantes por parte de las plantas, como así también los procesos por los cuales el nitrógeno aportado deja de estar disponible para los cultivos. Uno de los mecanismos de pérdida de nitrógeno que podría ocurrir es la desnitrificación, la cual varía ampliamente entre los distintos ecosistemas desde menos de uno a más de 100 kg N ha⁻¹ año⁻¹ (Colbourn, Dowdell 1984)). Esta variación es debida al efecto combinado de varios factores que regulan la tasa de desnitrificación como son carbono disponible, contenido de humedad, concentración de nitratos, los cuales presentan una alta variabilidad espacial y temporal (Folorunso, Rolston 1986). Myrold (1988) mediante un análisis de regresión múltiple mostró que el 43% de la variabilidad en la tasa de desnitrificación en sistemas cultivados estaba asociada a cambios en el contenido de humedad, tasa de respiración y temperatura del suelo. Mas recientemente, en un ensayo realizado en la región pampeana, se demostró que el espacio poroso lleno de agua, el contenido de nitrato y el carbono mineralizable explicaban el 55% de la variación en la tasa de des-

nitrificación (Rodríguez, Giambiagi 1995). Sin embargo, a nivel paisaje Groffman y Tiedje (1989) explicaron el 86% de las pérdidas anuales por desnitrificación incorporando en su modelo la textura y la clase de drenaje del suelo. Grundmann *et al.* (1988) sugieren que las interacciones entre los factores del suelo que regulan el proceso y la pobre caracterización del contenido de nitrato y carbono en el microsítio, son las causas de la discrepancia entre el flujo de N₂O medido y el calculado a partir de un modelo.

Los factores mencionados, al regular la tasa de desnitrificación, controlan también la cantidad total del nitrógeno perdido por esta vía. Goulding *et al.* (1993) encontraron diferencias significativas en la cantidad total de nitrógeno perdido por desnitrificación entre parcelas fertilizadas con 222 kg N ha⁻¹ como KNO₃ y, sin fertilizar cultivadas con trigo. A pesar de ello, las pérdidas sólo representaron el 5,3% del nitrógeno aplicado, resultado adjudicado por los autores a las condiciones secas y de baja temperatura que siguieron a la fertilización. Estudios con ¹⁵N y lisímetros indican que, dependiendo del tipo de cultivo y clima, puede perderse vía desnitrificación desde 10 a 20% del fertilizante agregado (Hauck 1981).

El objetivo de este trabajo fue determinar el efecto de la fertilización nitrogenada sobre la tasa de desnitri-

ficación de un suelo de Balcarce (Argentina), durante el desarrollo de un cultivo de trigo. Con el fin de identificar el principal factor que regula este proceso, se determinó la concentración de nitratos, el contenido de humedad y de carbono orgánico soluble.

MATERIALES Y METODOS

Las mediciones se efectuaron en un ensayo del Campo Experimental de la EEA-INTA Balcarce (37° 45' S, 58° 18' O), en el sudeste de la Provincia de Buenos Aires, Argentina durante el ciclo del trigo cuyo cultivo antecesor fue maíz. En el horizonte superficial del suelo, clasificado como Argiudol Típico, el contenido de fósforo disponible fue de 32,5 $\mu\text{g g}^{-1}$, de materia orgánica 60 g kg^{-1} y el pH 6,3 (relación suelo:agua; 1:2,5). Las labores de preparación del suelo comenzaron a principios de junio de 1994, con la realización de dos pasadas de rastra de disco y a los siete días una pasada con arado de rejas. A mediados de julio se sembró la variedad ProINTA Oasis y se aplicaron en línea 150 kg ha^{-1} de superfosfato triple de calcio. El fertilizante nitrogenado, urea, se aplicó al voleo tres días antes de la siembra. El diseño del ensayo fue en bloques completos aleatorizados con tres repeticiones y dos niveles de fertilización nitrogenada: 0 y 120 kg N ha^{-1} . El tamaño de la unidad experimental fue de 1,5 x 40 m.

La tasa de desnitrificación a campo se determinó en cilindros con suelo sin disturbar, usando la técnica de inhibición por acetileno (Yoshinari, Knowles 1976). En cada unidad experimental se colocaron, al azar, seis cilindros de PVC (4,2 cm de diámetro y 20 cm longitud) que luego de ser introducidos hasta una profundidad de 10 cm se extrajeron del suelo evitando alterar la muestra de suelo. Al sacar los cilindros se colocaron tapones de goma en ambos extremos, al tapón del extremo superior se le colocó un septum que permitió la obtención de muestras gaseosas. En el laboratorio, después de ser aireados por unos minutos los cilindros fueron tapados nuevamente y el 10% del volumen total de aire de los mismos fue reemplazado por acetileno. Este gas fue generado inmediatamente antes de usarlo, humedeciendo con agua la roca de carburo de calcio. Luego de agregar acetileno, los cilindros fueron mantenidos a temperatura ambiente durante 24 hs. A las 3 y 24 hs de incubación se tomaron muestras del espacio aéreo (5 ml) y se guardaron a 4°C en recipientes herméticos, a los que previamente se les hizo vacío. Posteriormente se analizó la concentración de N_2O en un cromatógrafo de fase gaseosa (Hewlett Packard Serie 5890) equipado con un detector de captura de electrones. Las temperaturas del inyector, horno y detector fueron de 60, 35 y 300°C, respectivamente. Una vez obtenidas las muestras de gases, el suelo fue removido de cada cilindro, mezclado y usado para determinar el contenido de humedad gravimétrica por secado a 105°C durante 24 hs. La tasa de desnitrificación, expresada como $\mu\text{g N-N}_2\text{O kg}^{-1}$ suelo seco h^{-1} , se calculó como la diferencia en la cantidad de $\text{N-N}_2\text{O}$ acumulada entre los muestreos de las 3 y 24 hs, y se corrigió con el coeficiente de Bunsen por la cantidad de N_2O disuelto en la solución del suelo. Las pérdidas por desnitrificación fueron monitoreadas desde emergencia hasta la antesis del trigo, realizándose los siguientes muestreos: 2/8, 21/9, 9/10 y 3/11.

Simultáneamente con la extracción de los cilindros se tomaron muestras compuestas de suelo a la profundidad de 10 cm para determinar nitratos y carbono orgánico soluble en agua, previo tamizado en húmedo por 4,8 mm. El contenido de nitratos se determinó con el método de microdestilación por arrastre de vapor (Bremner, Keeney 1966), luego de la extracción del suelo con K_2SO_4 al 4%. El carbono orgánico soluble en agua se estableció según el método de Mebius (1960), con algunas

modificaciones. El suelo (10 g) fue agitado con 20 ml de agua destilada durante 30 min a 140 rpm. Esta suspensión se centrifugó por 5 min a 19.500g, luego el sobrenadante se centrifugó durante 60 min a esta misma velocidad, y el sobrenadante de esta segunda centrifugación se filtró a través de un filtro membrana de 0,22 μm de diámetro de poro. Una alícuota del extracto obtenido fue tratada con 5 ml de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 0,06N y 15 ml H_2SO_4 concentrado, en tubos de vidrio de 60 ml conectados a refrigerantes. La mezcla fue hervida suavemente por 30 min a 160°C en un bloque de aluminio. Después de enfriarse y en presencia de dos o tres gotas de indicador (sulfato ferroso y fenantrolina) se tituló, por retroceso, con sal de Mohr 0,03N.

Los datos fueron analizados estadísticamente usando el programa SAS (SAS Institute Inc. 1985). Se realizó un análisis de variancia con mediciones repetidas en el tiempo para determinar la significancia de los efectos de fecha de muestreo y nivel de fertilización, en cada una de las variables mencionadas. En los casos necesarios se empleó el test de las diferencias mínimas significativas para comparar las medias entre tratamientos. También se hicieron análisis de correlación simple entre la tasa de desnitrificación y nitratos, carbono soluble y contenido de humedad.

RESULTADOS Y DISCUSION

Se observó una variación estacional en el contenido de nitratos que difirió del modelo de evolución de la tasa de desnitrificación, contenidos de nitratos altos en las parcelas fertilizadas no se correspondieron siempre con una alta tasa de N_2O . Los niveles más elevados de nitratos fueron registrados luego de la aplicación del fertilizante y/o barbecho, coincidiendo también con la menor demanda de nitratos por parte del cultivo. Se encontraron efectos significativos ($P < 0,05$) por fertilización en las tres primeras fechas de muestreo, no registrándose diferencias entre el testigo y fertilizado en el mes de noviembre. En el testigo, en septiembre y en los meses siguientes, el contenido de nitratos fue de 4,90 $\mu\text{g N-NO}_3^- \text{g}^{-1}$ o menor; por el contrario, en el fertilizado estos niveles de nitrato se alcanzaron recién en noviembre. La nitrificación del amonio derivado de la hidrólisis de la urea contribuyó a estos mayores niveles de nitrato (Figura 1).

No hubo diferencias en el contenido de humedad entre el testigo y fertilizado; sin embargo se detectaron diferencias significativas ($P < 0,05$) entre las distintas fechas de muestreo (Figura 1). El contenido de humedad promedio en los meses de septiembre (0,19 g g^{-1}) y noviembre (0,17 g g^{-1}) fue menor que el correspondiente a capacidad de campo (0,25 g g^{-1}); sin embargo, se superaron significativamente estos valores en agosto (0,34 g g^{-1}) y octubre (0,29 g g^{-1}) como consecuencia de las precipitaciones previas registradas. En agosto la precipitación total fue muy baja (14,2 mm) pero se muestreo dos días después de una lluvia de 37 mm ocurrida el 31 de julio, en septiembre la precipitación total fue de 37 mm y sólo habían caído 8 mm veinte días

antes del muestreo, octubre fue el mes con mayores precipitaciones (121,8 mm) recibiendo el suelo 35 mm de agua dos días previos a la extracción de las muestras, y en noviembre el momento de muestreo fue precedido por un período de dieciocho días sin precipitaciones.

La aplicación de nitrógeno disminuyó significativamente el contenido de carbono orgánico soluble ($P < 0,05$), en el testigo el valor promedio fue de $45,60 \mu\text{g C g}^{-1}$ y en el fertilizado de $35,41 \mu\text{g C g}^{-1}$ (Figura 1). Este pool es una fuente de carbono inmediatamente disponible para los microorganismos (McGill *et al.* 1986). Usando técnicas de ^{14}C marcado Xu y Juma (1993) encontraron que la mayoría del carbono respirado por los microorganismos, durante los diez días de incubación del suelo, provenían del carbono orgánico soluble en agua. De acuerdo a Burford y Bremner (1975) para producir $1,17 \mu\text{g N-N}_2\text{O}$ se requiere $1 \mu\text{g}$ de carbono disponible; por lo tanto la cantidad de carbono orgánico soluble consumido por los desnitrificadores es pequeña, aún en el fertilizado y no explicaría la diferencia de $10 \mu\text{g C g}^{-1}$ entre ambos tratamientos. Es posible que en presencia de nitrógeno mineral, el carbono orgánico fácilmente disponible haya sido asimilado rápidamente por los microorganismos del suelo para ser transformado en células y productos microbianos (Juma, McGill 1986). Sin embargo, en un ensayo de trigo bajo la misma labranza, Ferrari *et al.* (1997) no observaron diferencias en la biomasa microbiana entre el tratamiento testigo y el fertilizado con 120 kg N ha^{-1} . El carbono soluble incrementó significativamente ($P < 0,05$) a través del ciclo del cultivo de trigo como consecuencia, entre otras causas, de la liberación de carbono por parte de las raíces y la solubilización de formas orgánicas más estables. Franzluebbers *et al.* (1995) sugieren que las raíces y sus productos de descomposición son una fuente importante de carbono fácilmente degradable, ya que el máximo desarrollo radicular del trigo que ocurriría en floración coincide con el pico de producción de C-CO_2 medida en el campo (Buyanovsky *et al.* 1985). A través del presente ensayo, las cantidades de carbono orgánico soluble fluctuaron entre $21,18$ y $55,11 \mu\text{g C g}^{-1}$, representado el $0,1$ a $0,13 \%$ del carbono orgánico total.

El análisis de varianza indicó para la tasa de desnitrificación una interacción significativa ($P < 0,01$) entre momento de muestreo y fertilización; de acuerdo al test de medias la tasa de producción de N_2O del fertilizado superó a la del testigo en agosto y octubre cuando el contenido de humedad fue igual o mayor de $0,29 \text{ g g}^{-1}$ y el de nitratos en el fertilizado igualó o excedió $19 \mu\text{g N-NO}_3 \text{ g}^{-1}$ (Figura 1). En septiembre en comparación con el mes anterior, en el fertilizado la tasa de producción de N_2O fue muy inferior aunque el contenido de nitratos fue elevado de $47,67 \mu\text{g N-NO}_3 \text{ g}^{-1}$ y el de

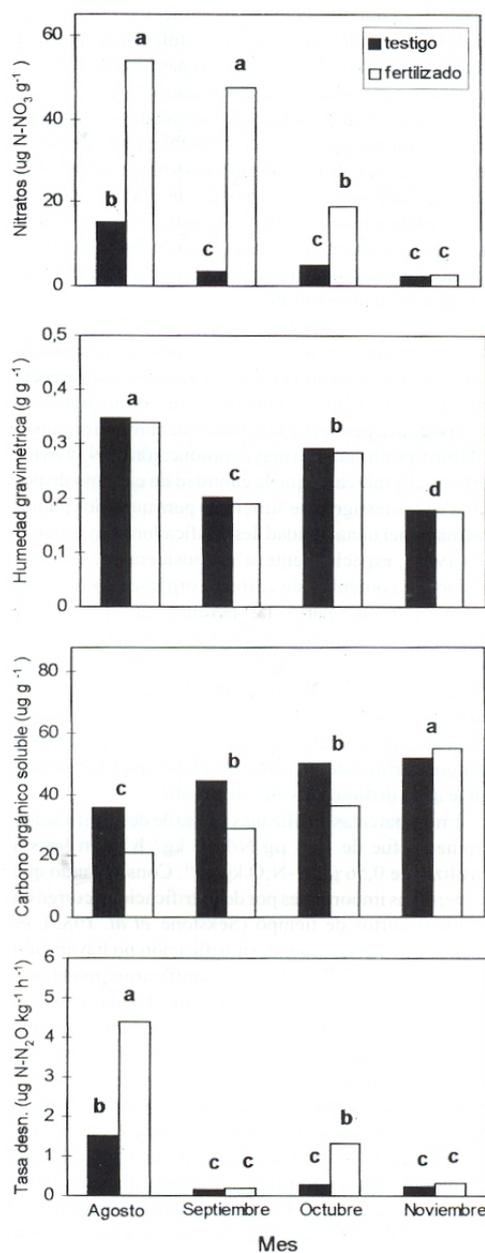


Figura 1. Variación en el contenido de nitratos, humedad, carbono orgánico soluble y tasa de desnitrificación, en parcelas con y sin nitrógeno. En las figuras que presentan humedad y carbono orgánico soluble letras distintas indican diferencias significativas ($P < 0,05$) entre fechas, en las restantes para cada fecha diferencias entre tratamientos.

carbono orgánico soluble estaba aumentando; de modo que la humedad del suelo, la cual fue inferior a capacidad de campo, podría haber limitado las pérdidas de N_2O . En octubre la capacidad de desnitrificación aumentó conjuntamente con el contenido de humedad, y en noviembre nuevamente fue muy baja, posiblemente debido a una pobre disponibilidad de nitratos y bajo contenido de humedad del suelo. En el testigo la máxima tasa de desnitrificación se registró en agosto, permaneciendo baja y relativamente constante en los meses siguientes debido al efecto combinado de una menor anaerobiosis y disponibilidad de nitratos.

Teniendo en cuenta que las parcelas de los testigos y las fertilizadas, recibieron las mismas precipitaciones y presentaron el mismo grado de aireación, la diferencia entre ellas en cuanto a la magnitud de las emisiones de N_2O podría depender de la cantidad de carbono orgánico soluble y de nitratos. La mayor producción de N_2O en los fertilizados indicaría que la cantidad de carbono disponible en los testigos fue suficiente para que ellos pudieran mantener una actividad desnitrificadora mayor que la observada, especialmente si se considera que en estos últimos el contenido de carbono orgánico soluble fue mayor. Por otra parte, las pérdidas de N_2O fueron superiores al comienzo que al final del ciclo del trigo cuando los niveles de carbono orgánico soluble fueron menores en ambos tratamientos. Por consiguiente, el carbono orgánico soluble del suelo no habría limitado la capacidad de desnitrificación y las diferencias entre el testigo y fertilizado, en agosto y octubre, podrían adjudicarse a los distintos niveles de nitrato.

En las parcelas fertilizadas la tasa de desnitrificación promedio fue de $1,56 \mu\text{g N-N}_2\text{O kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ y en las sin fertilizar de $0,56 \mu\text{g N-N}_2\text{O kg}^{-1} \text{h}^{-1}$. Considerando que las pérdidas importantes por desnitrificación ocurren en períodos cortos de tiempo (Sexstone *et al.* 1985), es posible que las tasas de desnitrificación no hayan sido máa altas debido a que no se cuantificaron inmediatamente luego de una lluvia, antes que el agua se mueva hacia abajo o lateralmente. Además, con este esquema mensual de muestreo no se habrían captado otros picos de producción de N_2O acontecidos luego de una lluvia. En un ensayo realizado en el mismo año, en un suelo Argiudol Típico con trigo bajo labranza convencional que tenía como cultivo antecesor soja en lugar de maíz, también se obtuvieron tasas de desnitrificación bajas (Picone *et al.* 1987). En general, las tasas de desnitrificación fueron bajas y en años con mayores precipitaciones podrían ser superadas.

El coeficiente de variación promedio, testigo y fertilizado, de la tasa de desnitrificación fue de 52%. Coeficientes similares han sido reportados por otros autores (Duxbury, McConnaughey 1986; Goulding *et al.* 1993);

sin embargo, numerosos estudios encontraron valores superiores a 100% (Christensen *et al.* 1990; Bergstrom, Beauchamp 1993). En el muestreo de agosto y en las parcelas fertilizadas, la tasa de desnitrificación fue de $4,41 \mu\text{g N-N}_2\text{O kg}^{-1} \text{h}^{-1}$, obteniéndose un coeficiente de variación bajo (16%) ya que los dieciocho cilindros analizados produjeron N_2O a tasas muy similares y elevadas. Por el contrario, en el muestreo de octubre en las mismas parcelas fertilizadas la tasa de producción de N_2O fue de $1,32 \mu\text{g N-N}_2\text{O kg}^{-1} \text{h}^{-1}$; originando un coeficiente de variación alto (117%), debido a que algunos cilindros registraron una tasa de desnitrificación equivalente o muy superior al valor mencionado. Estos datos reflejan la gran variabilidad espacial y temporal de la reducción biológica de nitrógeno, típica de sistemas agrícolas, que hace difícil predecir las pérdidas gaseosas bajo condiciones de campo o extrapolar los resultados de laboratorio a ambientes naturales.

La relación entre la tasa de desnitrificación y el contenido de humedad no indicó una tendencia lineal sino exponencial (Figura 2) como ha sido señalado por otros autores (Klemetsson *et al.* 1991; Klein, van Logtestijn 1995). Existe un valor crítico de humedad, por encima del cual la tasa de desnitrificación fue superior a $1 \mu\text{g N-N}_2\text{O kg}^{-1} \text{h}^{-1}$, que fue de $0,36 \text{ g g}^{-1}$ en el testigo y de $0,27 \text{ g g}^{-1}$ en el fertilizado. Asumiendo una densidad de $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$ estos valores corresponden a $0,43$ y $0,32 \text{ cm cm}^{-3}$ de humedad volumétrica. En coincidencia, Palma *et al.* (1997) registraron las mas altas pérdidas de N_2O cuando el contenido de humedad del suelo en volumen excedió $0,30 \text{ cm cm}^{-3}$.

La relación entre la tasa de desnitrificación y el contenido de nitratos mostró una dispersión en los datos, con una correlación positiva y significativa (Figura 2). También, una correlación significativa y positiva ($r^2=0,14$) fue obtenida por Rodríguez y Giambiagi (1995) en un cultivo de trigo en un suelo Argiudol Típico. En el gráfico, se observan valores bajos de desnitrificación aún con altos contenidos de nitratos, pero están asociados a bajos contenidos de humedad indicando que el agua es el factor desencadenante de la desnitrificación.

La tasa de desnitrificación estuvo negativa y significativamente correlacionada con la concentración de carbono orgánico soluble (Figura 2). La disponibilidad de carbono fácilmente degradable a partir de los exudados radiculares y raíces muertas, podría inducir a un mayor turnover de la población microbiana reduciendo la concentración de enzimas reductoras (Dendooven *et al.* 1996). Investigaciones sobre relaciones entre estas dos variables mostraron resultados contradictorios. En suelos bien y regularmente drenados la correlación entre carbono extractable con agua y la tasa de desnitrificación fue positiva y altamente significativa, mientras que en

los suelos pobremente drenados fue no significativa (Beauchamp *et al.* 1980). Para tasas de desnitrificación superiores a $0,1 \text{ g N-N}_2\text{O m}^{-3} \text{ día}^{-1}$ se registraron coeficientes de correlación negativos (Grundmann *et al.* (1988), igualmente para suelos fertilizados con $80 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Benckiser *et al.* 1997). Esta significativa y negativa correlación entre el flujo de N_2O emitido y la

relación carbono/nitrato indica que a menor relación dador/aceptor de electrones mayor es la cantidad de N_2O liberado (Benckiser *et al.* 1997).

En conclusión, en trigo bajo siembra convencional la tasa de desnitrificación promedio fue baja, $1,56 \text{ } \mu\text{g N-N}_2\text{O kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ en los fertilizados y $0,56 \text{ } \mu\text{g N-N}_2\text{O kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ en los testigos, sin embargo en algunas ocasiones incrementó a $5,13 \text{ } \mu\text{g N-N}_2\text{O kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ que representaría una pérdida de $0,17 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$. La mayor tasa de desnitrificación fue medida en agosto cuando el contenido de humedad y de nitratos fueron elevados; siendo las pérdidas superiores en los fertilizados. El nivel de humedad ejerce un mayor control sobre la desnitrificación que el de nitratos, observándose un rango crítico de humedad, por encima del cual se desencadena el proceso.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue subsidiada por la Universidad Nacional de Mar del Plata (Proyecto: Dinámica de nitrógeno y azufre en los suelos del Sudeste Bonaerense), International Foundation for Science (IFS) de Suecia (Research Agreement C/2239-1), y la EEA INTA Balcarce (Proyecto Estratégico de Investigación 80033: Dinámica del nitrógeno en ecosistemas agrícolas de la región Pampeana).

REFERENCIAS

- Beauchamp E G, Gale C, Yeomans J C. 1980. Organic matter availability for denitrification in soils of different textures and drainage classes. *Soil Sci. Plant Anal.* 11:1221-1233
- Benckiser G, Eilts R, Linn A, Lorch H J, Sumer E, Weiske A, Menzhofer F. 1997. N_2O emissions from different cropping systems and from aerated, nitrifying and denitrifying tanks of a municipal waste water treatment plant. *Biol. Fert. Soils* 23:257-265
- Bergstrom D W, Beauchamp E G. 1993. Relationships between denitrification rate and determinant soil properties under barley. *Can. J. Soil Sci.* 73:567-578
- Bremner J M, Keeney D R. 1966. Determination and isotope-ratio analysis of different forms of nitrogen in soils. III Exchangeable ammonium, nitrate and nitrite by extraction distillation methods. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 30:577-582
- Burford J R, Bremner J M. 1975. Relationships between the denitrification capacities of soils and total, water-soluble and readily decomposable soil organic matter. *Soil Biol. Biochem.* 7:389-394
- Buyanovsky G A, Wagner G H, Gantzer C J. 1986. Soil respiration in a winter wheat ecosystem. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50:338-344
- Christensen S, Simkins S, Tiedje J M. 1990. Spatial variation in denitrification: Dependency of activity centers on the soil environment. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:1608-1613
- Colbourn P, Dowdell R J. 1984. Denitrification in field soils. *Plant Soil* 76:213-226
- Dendooven L, Duchateau L, Anderson J M. 1996. Gaseous products of the denitrification process as affected by the antecedent water regime of the soil. *Soil Biol. Biochem.* 28:239-245

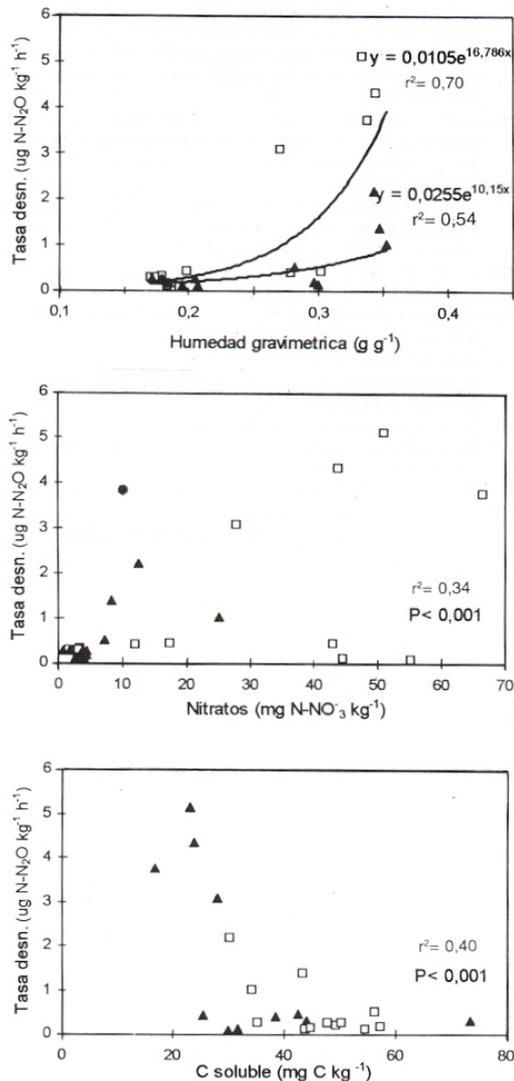


Figura 2. Relación entre el contenido de humedad gravimétrica, nitratos y carbono orgánico soluble, y la tasa de desnitrificación en parcelas con y sin aplicación de nitrógeno. Testigo: símbolos llenos, fertilizado: símbolos vacíos.

- Duxbury J M, McConaughy P K. 1986. Effect of fertilizer source on denitrification and nitrous oxide emissions in a maize-field. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50:644-648
- Ferrari J L, García F O, Echeverría H E. 1997. Evolución del carbono y nitrógeno de la biomasa microbiana durante el desarrollo del cultivo de trigo. *Ciencia del Suelo* 15:64-71
- Folorunso O A, Rolston D E. 1986. Spatial variability of field measured denitrification gas fluxes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40:1214-1219
- Franzluebbers A J, Hons F M, Zuberer D A. 1995. Tillage and crop effects on seasonal soil carbon and nitrogen dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59:1618-1624
- Goulding K W T, Webster C P, Powlson D S, Poulton P R. 1993. Denitrification losses of nitrogen fertilizer applied to winter wheat following ley and arable rotations as estimated by acetylene inhibition and ^{15}N balance. *J. Soil Sci.* 44: 63-72
- Groffman P M, Tiedje J M. 1989. Denitrification in north temperate forest soils: Spatial and temporal patterns at the landscape and seasonal scales. *Soil Biol. Biochem.* 21:613-620
- Grundmann G L, Rolston D E, Kachanoski R G. 1988. Field soil properties influencing the variability of denitrification gas fluxes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52:1351-1356
- Hauck R D. 1981. Nitrogen fertilizer effects on nitrogen cycle processes. En: Clark F E and Rosswall T (Eds). *Terrestrial N cycles*. Ecol. Bull. Stockholm. pp 551-562
- Juma N G, McGill W B. 1986. Decomposition and nutrient cycling in agro-ecosystems. En: Mitchell M J and Nakas J P (Eds). *Microfloral and faunal interactions in natural and agro-ecosystems*. Nijhoff/Junk. Netherlands. pp 74-136
- Klein C A M, van Logtestijn R S P. 1996. Denitrification in grassland soils in the Netherlands in relation to irrigation, N-application rate, soil water content and soil temperature. *Soil Bio. Biochem.* 28:231-237
- Klemetsson L, Simkins S, Svensson B H, Johnsson H, Rosswall T. 1991. Soil denitrification in three cropping systems characterized by differences in nitrogen and carbon supply. II Water and NO_3^- effects on the denitrification process. *Plant Soil* 138:273-286
- McGill W B, Cannon K R, Robertson J A, Cook F D. 1986. Dynamics of soil microbial biomass and water-soluble organic C in Breton L after 50 years of cropping of two rotations. *Can. J. Soil Sci.* 66:1-19
- Myrold D D. 1988. Denitrification in ryegrass and winter wheat cropping systems of western Oregon. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52:412-416
- Mebius L J. 1960. A rapid method for the determination of organic carbon in soil. *Anal. Chem. Acta* 22:120-124
- Palma R M, Rimolo M, Saubidet M I, Conti M E. 1997. Influence of tillage system on denitrification in maize-cropped soils. *Biol. Fert. Soils* 25:142-146
- Picone L I, Videla C C, García F O. 1997. Desnitrificación durante el cultivo de trigo en un Argiudol típico bajo siembra directa y labranza convencional. *Ciencia del Suelo* 15:53-58.
- Rodríguez M B, Giambiagi N. 1995. Denitrification in tillage and no tillage pampean soils: Relationships among soil water, available carbon, and nitrate and nitrous oxide production. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 26:19-20
- SAG y P. 1995. Boletín de insumos agrícolas. Fertilizantes. Campaña 1995-6. 4p
- SAS Institute 1985. SAS user's guide: Statistic. Version 5.18 de. SAS Inst., Cary, NC
- Sexstone A J, Parkin T B, Tiedje J M. 1985. Temporal response of soil denitrification rates to rainfall and irrigation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:99-103
- Yoshinari T, Knowles R. 1976. Acetylene inhibition of nitrous oxide reduction by denitrifying bacteria. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 69:705-710
- Xu J G, Juma N G. 1993. Above and below-ground transformation of photosynthetically fixed carbon by two barley (*Hordeum vulgare* L.) cultivars in a typical cryoboroll. *Soil Biol. Biochem.* 25:1263-1272