

DESNITRIFICACION DURANTE EL CULTIVO DE TRIGO EN UN ARGUJODOL TIPICO BAJO SIEMBRA DIRECTA Y LABRANZA CONVENCIONAL

L I PICONE, C C VIDELA, F O GARCIA

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

DENITRIFICATION IN A TYPIC ARGUJODOLL UNDER CONVENTIONAL AND NO-TILLAGE WHEAT

During the 1994/95 growing season of wheat, denitrification rates were measured simultaneously under conventional and no-tillage management in a Typic Argiudoll, each receiving two rates of nitrogen fertilizer: 0 and 120 kg N ha⁻¹. Nitrate concentration and water content were also measured in order to evaluate the effect of soil conditions on denitrification. Nitrogen gas loss was seasonal, with no-tillage having the most activity when the uptake of nitrate and water by crop was low. Denitrification rates from no-tillage (0,77 ng N-N₂O g⁻¹ h⁻¹) were greater than those from conventional tillage (0,13 ng N-N₂O g⁻¹ h⁻¹) despite soil nitrate and water content being similar. The soil under no-tillage had less number of pores bigger than 20 µm and hence a lower rate of drainage; this suggests that under no-tillage the soil will be for a longer time under anaerobic conditions resulting in the greater synthesis of denitrifying enzymes. Under no-tillage, denitrification rate tended to increase with increased water and nitrate content, and was significantly correlated with both, water (r²=0,216; P< 0,01) and nitrate content (r²=0,213; P< 0,01). Under conventional tillage, denitrification rate did not exhibit the same seasonal pattern as no-tillage and was only correlated with water content (r² 0,440; P< 0,01).

Key words: Denitrification-Nitrous oxide-Wheat-Argiudoll-Water content-Tillage

INTRODUCCION

El proceso de desnitrificación es afectado principalmente por tres factores del suelo: contenido de humedad, de carbono orgánico disponible y concentración de nitratos (Firestone 1984). Las prácticas de manejo de cultivo y suelo que controlan el suministro de nitrato y carbono disponible, a través de la descomposición de los residuos, podrían tener un efecto importante sobre la capacidad de desnitrificación de los suelos. A su vez, diferencias en el manejo de los suelos pueden conducir a diferencias en la porosidad, lo cual influiría en su grado de aireación e induciría a cambios en las especies microbianas existentes bajo esas condiciones. En cultivos de maíz y sorgo bajo siembra directa se observaron mayores tasas de desnitrificación respecto de labranza convencional (Rice, Smith 1982, Groffman *et al.* 1987). Caskey (1983) reportó pérdidas significativas por desnitrificación en cultivos de maíz, luego de cuatro años de siembra directa, no observándose esta diferencia en otro suelo en su primer año de siembra directa. En cultivos de maíz en las localidades de Illinois, Nebraska y Minnesota, la producción de N₂O de los suelos fertilizados fue 9,4 veces superior en siembra directa que en labranza convencional (Linn, Doran 1984). En general, las pérdidas anuales de nitrógeno como N₂O son dos a tres veces

superiores en suelos sin labranza que en suelos laboreados (Aulakh *et al.* 1982, Groffman *et al.* 1987). Estas mayores pérdidas por desnitrificación en suelos con siembra directa han sido adjudicadas a numerosas causas, entre ellas, a que generalmente en suelos sin laboreo se observa un mayor contenido de humedad el cual estimula la actividad enzimática desnitrificadora (Rice, Smith 1982), una mayor disponibilidad de energía para los microorganismos desnitrificadores (Aulakh *et al.* 1984) y un mayor número de bacterias desnitrificadoras (Doran 1980).

Si bien existen estudios referentes al efecto del laboreo sobre la capacidad de desnitrificación (Palma *et al.* 1993) y la desnitrificación potencial (Rodríguez, Giambiagi 1993) durante el cultivo de maíz, es necesario disponer de mayor información sobre estimaciones de las pérdidas de nitrógeno a través de la desnitrificación a campo en los distintos sistemas agropecuarios y cultivos, lo cual sería importante para poder definir su rol y contribución en el balance general del ciclo del nitrógeno. Los objetivos de este estudio fueron 1) cuantificar los efectos de la siembra directa y labranza convencional sobre la tasa de desnitrificación a campo en un Argiudol típico, durante el desarrollo del cultivo de trigo y 2) establecer la relación posible entre la capacidad de desnitrificación y algunos factores del suelo conocidos por afectarla, como son el contenido de nitratos y humedad.

MATERIALES Y METODOS

Características del sitio experimental y momento de muestreo

Las determinaciones se efectuaron en 1994 sobre un ensayo de sistemas de labranza iniciado en 1992, ubicado en la EEA INTA Balcarce Argentina (37° 45' S, 58° 18' O). El ensayo se llevó a cabo sobre un Argiudol típico de textura superficial franca con un contenido de carbono orgánico total de 30,7 g kg⁻¹, de fósforo disponible de 12,2 mg kg⁻¹ y un pH de 5,7 (relación suelo: agua, 1:2,5). Previo a la implementación del ensayo, el sitio experimental tuvo una historia de uso agrícola muy prolongada bajo labranza convencional. Los cultivos antecesores fueron trigo en el año 1992 y soja en 1993. El diseño experimental fue parcelas divididas con tres bloques completos aleatorizados, siendo el área de la unidad experimental de 120 m² (3 x 40 m). Los tratamientos evaluados fueron siembra directa (SD) y labranza convencional (LC) en las parcelas principales y dos niveles de nitrógeno: 0 y 120 kg N ha⁻¹ como urea en las subparcelas. La labranza convencional se inició el 3 de junio con una pasada de rastra de disco liviana y continuó el 9 de junio con una pasada de arado de rejas. La preparación de la cama de siembra se efectuó con rastra de disco en tándem con una rastra de dientes y dos pasadas finales de rastra de dientes. En las parcelas bajo SD se aplicó glifosato (3,5 l ha⁻¹), el 12 de julio. La fertilización nitrogenada se realizó en cobertura total al voleo, el 16 de julio. El 18 de julio se sembró y aplicó en línea superfosfato triple de calcio para que fósforo no fuera un nutriente limitante. La variedad de trigo fue PROINTA Oasis a una densidad de 410 semillas m⁻². Los muestreos de suelo fueron mensuales en agosto, octubre y noviembre, mientras que en septiembre se realizó un muestreo a comienzos del mes y otro a su finalización.

Determinación de desnitrificación y contenido de nitratos

La capacidad de desnitrificación a campo se midió en cilindros estáticos, sin recirculación de aire, empleando la técnica de inhibición por acetileno (Yoshinari, Knowles 1976). Se recogieron muestras de suelo sin disturbar de 10 cm de profundidad, en cilindros de PVC de 4,4 cm de diámetro. De cada parcela, se extrajeron seis cilindros colocados al azar entre surcos, sin dañar las raíces. Luego del muestreo los cilindros fueron llevados inmediatamente al laboratorio, y ambos extremos cerrados herméticamente con un tapón de goma. Un volumen equivalente a 10% del espacio aéreo de los cilindros conteniendo suelo, fue extraído y reemplazado por acetileno el cual fue generado al humedecer carburo de calcio. Los cilindros fueron incubados a temperatura ambiente por un período de 24 hs. A las 3 y 24 hs de incubación, se tomaron muestras (5 ml) del espacio aéreo de los cilindros y almacenaron a 4°C en recipientes herméticos, a los cuales previamente se les aplicó vacío, para analizar posteriormente la concentración de N₂O.

La concentración de N₂O se cuantificó en un cromatógrafo de fase gaseosa (Hewlett Packard 5809) equipado con un detector de captura de electrones de ⁶³Ni operado a 300°C y una columna Megabore (J & W Scientific) de 30 m con una temperatura del horno de 40°C. Se utilizó N₂ como gas transportador con una velocidad de flujo de 15 ml min⁻¹. La tasa de desnitrificación, se calculó como la diferencia en la producción acumulada de N₂O entre las 3 y 24 hs de incubación y se corrigió por la cantidad de N₂O disuelto en el agua con el coeficiente de Bunsen. Simultáneamente con el muestreo de los cilindros se extrajo de cada parcela, una muestra compuesta de 25 submuestras correspondiente a los primeros 10 cm de suelo para determinar el contenido de nitratos, mediante el método de microdestilación

por arrastre de vapor (Bremner, Keeney 1966). Para ello, las muestras con su contenido de humedad de campo fueron tamizadas por 4,8 mm y mantenidas a 4°C hasta su análisis. En cada cilindro, el contenido de humedad se determinó gravimétricamente, secando el suelo en estufa a 105°C hasta peso constante.

El contenido de humedad expresado en términos de porcentaje de poros llenos de agua, se calculó dividiendo el contenido de humedad volumétrica por el espacio poroso total. El espacio poroso total se calculó según la ecuación:

Espacio poroso total = (1 - densidad aparente/densidad de partícula) asumiendo una densidad de partícula de 2,65 Mg m⁻³ y utilizando un valor promedio de densidad aparente de 1,4 Mg m⁻³, determinada por el método del cilindro en el mismo ensayo por Ferreras *et al.* (1996).

Análisis estadístico

Los resultados fueron sometidos a un análisis de varianza como mediciones repetidas (Milliken, Johnson 1984), considerando a los sistemas de labranza como las parcelas principales, a las dosis de nitrógeno las subparcelas y a las fechas de muestreo las subsubparcelas. Se empleó el test de LSD para establecer las diferencias significativas entre las medias de los tratamientos (SAS Institute Inc. 1988). Se realizó un análisis de correlación entre la tasa de desnitrificación y el contenido de nitratos y de humedad para cada sistema de labranza, usando las repeticiones de cada variable medida en las distintas fechas de muestreo. Se evaluó la distribución normal de las variables mencionadas mediante el test de Shapiro y Wilk (SAS Institute Inc. 1988).

RESULTADOS

Tasa de desnitrificación

Tanto en SD como en LC, las tasas de desnitrificación se distribuyeron simétricamente, con coeficientes de variación que fluctuaron desde 38 a 120% en SD y de 30 a 90% en LC. Se observaron diferencias significativas (P<0,05) en la tasa de desnitrificación entre sistemas de labranzas y entre niveles de fertilización e interacciones significativas (P<0,05) de sistema de labranzas con fechas de muestreo, y de sistema de labranzas con niveles de fertilización. En los muestreos de agosto y 2 de septiembre, la tasa de desnitrificación fue significativamente (P<0,05) mayor bajo SD que bajo LC (Figura 1). Se registraron pérdidas de 1,37 ng N-N₂O g⁻¹ h⁻¹ en SD y 0,045 ng N-N₂O g⁻¹ h⁻¹ en LC en agosto, y de 2,05 ng N-N₂O g⁻¹ h⁻¹ en SD y 0,30 ng N-N₂O g⁻¹ h⁻¹ en LC en septiembre. Analizando la interacción labranzas x fertilización se observó que la tasa de desnitrificación en SD fue significativamente mayor (P<0,05; LSD = 0,26 ng N-N₂O g⁻¹ h⁻¹) en el tratamiento fertilizado (1,0 ng N-N₂O g⁻¹ h⁻¹) que en el testigo (0,53 ng N-N₂O g⁻¹ h⁻¹), mientras que en LC no se observaron diferencias significativas entre tratamientos de fertilización; 0,09 y 0,18 ng N-N₂O g⁻¹ h⁻¹ para el testigo y el fertilizado, respectivamente.

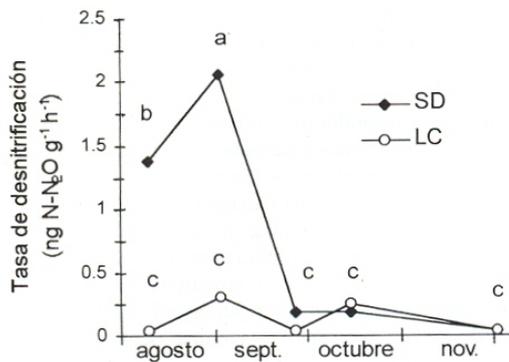


Figura 1. Tasa de desnitrificación bajo siembra directa (SD) y labranza convencional (LC) durante el desarrollo del cultivo de trigo, promedios para tratamientos testigo y fertilizado. Letras diferentes indican diferencias significativas a $P < 0,05$. (DSM = $0,617 \text{ ng N-N}_2\text{O g}^{-1} \text{ h}^{-1}$).

Nitratos y humedad

Las determinaciones del contenido de humedad y de nitratos se distribuyeron normalmente. El nivel de nitratos en suelo no fue afectado por el sistema de labranza, pero se observó una interacción significativa ($P < 0,05$) entre fechas de muestreo y nivel de fertilización (Figura 2). En los muestreos de agosto y septiembre, el contenido de nitratos en las parcelas fertilizadas superó significativamente al de las parcelas testigo, no manifestándose diferencias significativas en los dos meses siguientes.

En ambos sistemas de labranzas, tanto en el testigo como fertilizado, el contenido de nitratos disminuyó durante el desarrollo del cultivo del trigo. Bajo LC, en las

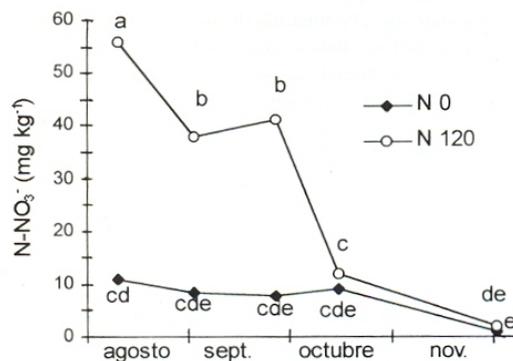


Figura 2. Nitrógeno como nitratos en los tratamientos testigo (0 N) y fertilizado (120 N) durante el desarrollo del cultivo de trigo, promedios para siembra directa y labranza convencional. Letras diferentes indican diferencias significativas a $P < 0,05$. (DSM = $9,7 \text{ mg N-NO}_3^- \text{ kg}^{-1}$).

parcelas fertilizadas, su valor disminuyó desde $65,3 \text{ mg N kg}^{-1}$ en agosto a $1,8 \text{ mg N kg}^{-1}$ en noviembre y en las parcelas testigos desde $10,3 \text{ mg N kg}^{-1}$ a $0,6 \text{ mg N kg}^{-1}$ considerando los mismos meses. Bajo SD, en el tratamiento fertilizado, el contenido de nitratos decreció desde $46,4 \text{ mg N kg}^{-1}$ en agosto a $1,8 \text{ mg N kg}^{-1}$ en noviembre, y en el testigo desde $11,4 \text{ mg N kg}^{-1}$ en agosto a $1,1 \text{ mg N kg}^{-1}$ para noviembre.

Se observó una interacción significativa ($P < 0,05$) en el contenido de humedad del suelo entre fecha de muestreo y sistema de labranzas: en los muestreos del dos de septiembre, octubre y noviembre no hubo diferencias significativas en el contenido de humedad entre ambos sistemas de labranza; sin embargo, en los muestreos de agosto y del 26 de septiembre, el contenido de humedad en SD fue significativamente mayor que en LC (Figura 3). En general, los contenidos de humedad variaron desde aproximadamente capacidad de campo ($0,25 \text{ g g}^{-1}$) hasta casi saturación, sin alcanzar contenidos de humedad muy bajos. En general, las determinaciones realizadas para evaluar la tasa de desnitrificación se realizaron en días inmediatamente posteriores a la ocurrencia de lluvias, lo que explica los contenidos de humedad similares entre sistemas de labranzas. Muestreos más frecuentes realizados en el

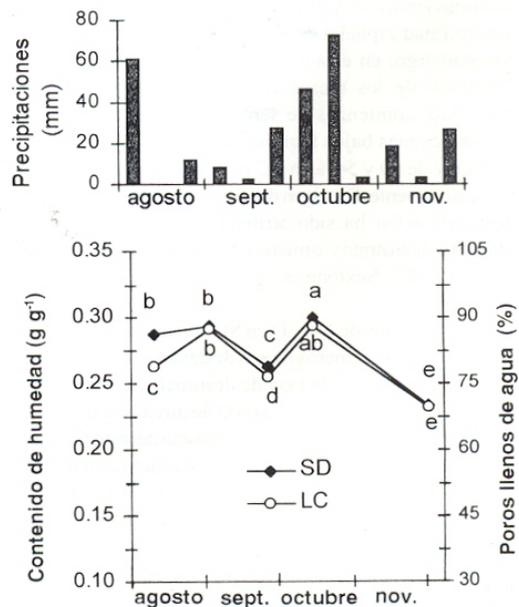


Figura 3. Precipitaciones decádicas, contenido de humedad y porcentaje de poros llenos de agua bajo siembra directa (SD) y labranza convencional (LC) durante el desarrollo del cultivo de trigo, promedios para tratamientos testigo y fertilizado. Letras diferentes indican diferencias significativas a $P < 0,05$. (DSM = $0,0066 \text{ g g}^{-1}$).

mismo ensayo por Ferreras *et al.* (1996) indican que bajo SD el contenido de humedad fue generalmente mayor que bajo LC.

Para tener un índice más práctico del grado de aireación del suelo el contenido de humedad se expresó como el porcentaje de poros llenos de agua, el cual fluctuó desde 69% a 89% bajo SD y, desde 69% a 87% bajo LC (Figura 3). Estos altos porcentajes de poros llenos de agua son una consecuencia de los contenidos relativamente altos de humedad y de la alta densidad aparente de los suelos.

DISCUSION

Los coeficientes de variación observados para la tasa de desnitrificación son comparables con aquellos obtenidos por Burton y Beauchamp (1984) y Parkin (1987). No se encontraron diferencias en cuanto al coeficiente de variación entre los sistemas de labranza y en general, el mismo no estaría asociado con la magnitud de las tasas de desnitrificación ya que, en ambas labranzas, tanto las altas como las bajas tasas de desnitrificación fueron igualmente variables. Christensen *et al.* (1990) mencionan que períodos con altos contenidos de humedad, pueden causar una distribución más uniforme de los sitios anaeróbicos y por lo tanto una disminución de la variabilidad espacial en el proceso de desnitrificación. Sin embargo, en esta experiencia, los coeficientes de variación de los meses con mayores contenidos de humedad, comienzos de septiembre y en octubre, no fueron los más bajos lográndose valores de 80 y 120% en SD, y de 90 y 54% en LC para septiembre y octubre, respectivamente. El origen de la variabilidad espacial de la desnitrificación ha sido atribuido a la distribución no uniforme de sustrato y/o microorganismos desnitrificadores (Parkin 1987, Sextone *et al.* 1988, Christensen *et al.* 1990).

Las pérdidas de N-N₂O en SD superaron a las de LC durante los dos primeros meses de desarrollo del cultivo. Estas diferencias en la tasa de desnitrificación podrían deberse a diferencias en el grado de aireación del suelo que afectaría la concentración de enzima desnitrificadora presente, ya que ambas labranzas prácticamente no difieren en el contenido de nitratos. En este ensayo, Ferreras *et al.* (1996) determinó la distribución del tamaño de poros encontrándose una mayor proporción de poros de diámetro mayor a 20 µm en LC (26,1%) que en SD (16,8%) que no se evidenció en diferencias en densidad aparente. Esto nos permitiría hipotetizar que la menor velocidad de drenaje mantendría las condiciones de anaerobiosis durante períodos más prolongados en las parcelas de SD lo que favorecería una mayor síntesis de enzima desnitrificadora. El régimen previo de anaerobiosis, independientemente del contenido actual

de humedad y concentración de nitrato en suelos afectaría el pool de enzimas reductoras de nitrógeno (Dendooven *et al.* 1996). Como ya fuera mencionado, en este ensayo, Ferreras *et al.* (1996) encontraron mayores contenidos de humedad bajo SD que bajo LC en determinaciones efectuadas con mayor frecuencia que las reportadas en la Figura 3. Esto indicaría un régimen previo de mayor anaerobiosis bajo SD. Otros autores han observado tasas de desnitrificación mayores para SD que LC (Burford *et al.* 1981, Aulakh *et al.* 1982, Rice, Smith 1982); sin embargo Groffman (1984) no halló diferencias significativas en desnitrificación entre ambos sistemas de labranza, debido a la gran variabilidad de los resultados.

La tasa de desnitrificación presentó variaciones mensuales, relacionadas con cambios en el ambiente del suelo. En SD, las mayores pérdidas de N₂O se observaron en agosto y comienzos de septiembre coincidentes con valores altos de nitrato y con contenidos de humedad superiores a capacidad de campo. En los períodos siguientes la disponibilidad de nitratos y/o agua podría estar limitando las pérdidas por desnitrificación. Esta tendencia se observó en los tratamientos testigos y fertilizados, aunque en estos últimos la tasa de desnitrificación fue superior. En LC, las tasas de desnitrificación más altas se registraron a comienzos de septiembre correspondiéndose con una alta disponibilidad de agua y nitratos, y en octubre donde el contenido de humedad fue alto pero el de nitratos había disminuido.

Bajo SD, el pico de desnitrificación correspondió a los dos de septiembre con 87% del espacio de poros llenos de agua y en el muestreo siguiente la tasa de desnitrificación decreció a pesar de que el nivel de nitratos se mantuvo casi constante. En este momento, el porcentaje de poros llenos de agua decreció a 78% indicando que el contenido de humedad estaría fuertemente condicionando la capacidad de desnitrificación a campo. Un contenido de agua elevado dificulta la difusión del oxígeno originando condiciones anaeróbicas que estimulan la síntesis y actividad de las enzimas desnitrificadoras (Tiedje 1988). La dependencia de desnitrificación por la humedad se evidenció con una correlación positiva y significativa ($r^2=0,215$; $P<0,01$) entre la tasa de desnitrificación y el contenido de humedad gravimétrica. Weier *et al.* (1993) encontraron en suelos de textura franco-arcillo-limosa y franco-limosa, que la tasa de desnitrificación incrementó rápidamente cuando el espacio de poros llenos de agua aumentó desde 75% a 90%. Valores superiores a 60% de poros llenos de agua son indicados por Linn y Doran (1984) como favorables para el desarrollo de condiciones anaeróbicas y sería el límite entre los procesos respiratorios aeróbicos y anaeróbicos. Sin embargo, es razonable suponer que hay

un rango de porcentaje de poros llenos de agua que define este valor crítico, el cual varía con la clase textural de los suelos (Klein, Logtestijn 1996).

Bajo LC, la tasa de desnitrificación también se relacionó con la humedad ($r^2=0,440$; $P < 0,01$) y se observó que el porcentaje de poros llenos con agua estuvo siempre por encima del valor límite de 60% al que se hizo referencia anteriormente.

En SD, la tasa de desnitrificación a campo se correlacionó significativamente con la concentración de nitrato ($r^2=0,213$; $P < 0,01$), pero en LC se observó una falta de relación entre ambas variables. Aunque la concentración de nitratos afecta la capacidad de desnitrificación ya que es el sustrato necesario para las enzimas desnitrificadoras, se han encontrado estudios en los cuales no hay correlaciones significativas entre desnitrificación y nitrato en suelos (Robertson, Tiedje 1984, Burton, Beauchamp 1985). En este trabajo, la falta de correlación entre tasa de desnitrificación y contenido de nitratos en LC podría atribuirse a que la desnitrificación habría estado limitada por otro factor del suelo, como la menor concentración de enzimas desnitrificadoras, debido a condiciones menos anaeróbicas, lo que habría impedido la expresión de la actividad desnitrificadora a pesar de la disponibilidad de nitratos.

En conclusión, este estudio demuestra que si bien las pérdidas de nitrógeno como N_2O son bajas, la tasa de desnitrificación promedio en SD fue mayor que la de LC. Los altos contenidos de humedad y la disponibilidad de nitratos debido a la fertilización nitrogenada y/o mineralización podrían incrementar las pérdidas de nitrógeno por desnitrificación en suelos bajo SD, especialmente al comienzo del desarrollo del cultivo de trigo cuando la demanda de agua y el consumo de nitratos por parte de la planta son menores. El comportamiento del suelo bajo LC fue distinto, manifestándose una falta de correlación entre la tasa de desnitrificación y el contenido de nitrato, aunque se correlacionó significativamente con el contenido de humedad. Debido a la alta variabilidad temporal de la tasa de desnitrificación a campo, muestreos mas frecuentes permitirían obtener estimaciones mas exactas de las pérdidas de N como N_2O con el fin de cuantificar el destino del nitrógeno en los ecosistemas.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue subsidiada por la Universidad Nacional de Mar del Plata (Proyecto: Dinámica de nitrógeno y azufre en 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

- Aulakh M S, Rennie D A, Paul E A. 1982. Gaseous nitrogen losses from cropped and summerfallowed soils. *Can. J. Soil Sci.* 62:187-195
- Aulakh M S, Rennie D A, Paul E A. 1984. The influence of plant residues on denitrification rates in conventional and zero tilled soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:790-794
- 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, Dowdell R J, Crees R. 1981. Emission of nitrous oxide to the atmosphere from direct drilled and ploughed clay soils. *J. Sci. Food Ag.* 32:219-223
- Burton D L, Beauchamp. 1984. Field techniques using the acetylene blockage of nitrous oxide reduction to measure denitrification. *Can. J. Soil Sci.* 64:555-562
- Burton D L, Beauchamp. 1985. Denitrification rate relationships with soil parameters in the field. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 16:539-549
- Caskey W H. 1983. Temporal effects of tillage practice on nitrification and denitrification. En: *Agronomy Abstracts*. ASA, Madison, Wisconsin. pp 154
- 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
- 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
- Doran J W. 1980. Soil microbial and biochemistry changes associated with reduced tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:765-771
- Ferreras L, Costa J L, Rizalli R, Garcia F O. 1996. Propiedades físicas del suelo bajo labranza convencional y siembra directa en el Sudeste Bonaerense. XV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo :17-18
- Firestone M K. 1984. Biological denitrification. En: Stevenson F J (Ed.). *Nitrogen in agricultural soils*. Agron. Monogr. 22. Am. Soc. Agron., Madison, Wisconsin. pp 289-326
- Groffman P M. 1984. Nitrification and denitrification in conventional and no-tillage soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:329-334
- Groffman P M, Hendrix P F, Crossley D A. 1987. Nitrogen dynamics in conventional and no-tillage agroecosystems with inorganic fertilizer or legume nitrogen inputs. *Plant Soil* 97:315-332
- Klein CA, van Logtestijn R S. 1996. Denitrification in grassland soils in the Netherlands in relation to irrigation, N-application rate, soil water content and soil temperature. *Soil Biol. Biochem.* 28:231-237
- Linn D M, Doran J W. 1984. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and non tilled soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:1267-1272
- Milliken G, Johnson D. 1984. *Analysis of messy data. Volume 1: Designed experiments*. Lifetime Learning Pub. Belmont, California. EEUU. pp 469.
- Palma R M, Rimolo M, Conti M. 1993. Pérdidas gaseosas de nitrógeno en suelos con diferentes sistemas de labranza y bajo cultivo de maíz. XIV Congreso Argentino de la ciencia del Suelo: 213-214.
- Parkin T B. 1987. Soil microsites as a source of denitrification variability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51:1194-1199

- Rice C W, Smith M S. 1982. Denitrification in no-till and plowed soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46:1168-1173
- Robertson G P, Tiedje J M. 1984. Denitrification and nitrous oxide production in successional and old growth Michigan forests. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:383-389
- Rodríguez M, Giambiagi N. 1993. Influencia de las labranzas sobre la desnitrificación de un Argiudol típico fertilizado con urea. XIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo: 57-58.
- SAS Institute Inc. 1988. SAS Procedures Guide, Release 6.03 Edition Cary, North Carolina. pp 1028
- Sexstone A J, Parkin T B, Tiedje J M. 1988. Denitrification response to soil wetting in aggregated and unaggregated soils. *Soil Biol. Biochem.* 20:767-769.
- Tiedje J M. 1988. Ecology of denitrification and dissimilatory nitrate reduction to ammonium. En: Zehnder A J B (Ed.). *Biology of anaerobic microorganisms*. John Wiley, New York. pp 179-244
- Weier K L, Doran J W, Power J F, Walters D T. 1993. Denitrification and the dinitrogen/nitrous oxide ratio as affected by soil water, available carbon, and soil nitrate. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:66-72
- Yoshinari T, Knowles R. 1976. Acetylene inhibition and nitrous oxide reduction by denitrifying bacteria. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 69:705-710