

MINERALIZACIÓN DE NITRÓGENO EN UN HAPLUSTOL TÍPICO: EFECTO DE LOS AÑOS DE AGRICULTURA Y DE LA HUMEDAD EDÁFICA

OA BACHMEIER, AA ROLLÁN

Departamento de Recursos Naturales, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba. Casilla de Correos 509 – (5000) Córdoba, Argentina. E-Mail: obachmei@agro.uncor.edu

Recibido 10 de junio de 2004, aceptado 21 de enero de 2005

SOIL NITROGEN MINERALIZATION IN A TYPIC HAPLUSTOLL: EFFECT OF YEARS OF AGRICULTURE AND SOIL WATER CONTENT

This paper focused on the effect of years under agriculture and soil moisture on soil nitrogen potential mineralization in a Typic Haplustoll located at Córdoba (Argentina). Plots of 2, 20 and 50 years under agriculture were selected and a quasi-pristine soil was used as control. Samples from each layer were incubated at 30 °C for 32 weeks to quantify nitrogen mineralization in optimal environmental conditions. The relationship between N mineralization and water content was found by measuring N mineralized (Nmin) during 14 days at -10, -30, -100, -200, -500, -1000 y -1500 kPa of soil water potential.

A simple exponential model (first order kinetics) was the one which best described “*in vitro*” N mineralization. Potentially mineralizable nitrogen (N_0) from the A horizons progressively decrease with years of farming from 500 to 258 mg kg⁻¹. It was shown that N_0 and the initial mineralization rate of the studied soil indicate adequately soil degradation induced by years of continuous farming. Under these experimental conditions Nmin was linearly associated to log of soil water potential in the *solum*. It may be inferred that the relation Nmin *versus* soil water content can be achieved using normalized variables. The interactive effect of mineralizable substrate with soil moisture (W) expressed in relative terms, on Nmin can be explained in a 90 % by the equation $Nmin = a + bN_0 + c(W/W_{max})$. Besides, the mineralized N can be estimated from the expression $Nmin/Nt = 0,022 - 0,49 (W/W_{max})^{-1}$ which is based on standard soil properties (Nt and W) and brings useful information for soil fertility management and input data for soil nitrogen budget simulations.

Key words: potential mineralization, mineralizable nitrogen, soil water, farming history.

INTRODUCCION

La mineralización del nitrógeno orgánico, al ser un proceso biológico, se encuentra determinada por la disponibilidad de sustrato mineralizable y por las condiciones ambientales imperantes en el suelo, particularmente el contenido hídrico, la temperatura y el suministro de oxígeno. La influencia de distintas características edáficas sobre la mineralización del nitrógeno ha sido ampliamente estudiada en distintos suelos, para diversas situaciones de cultivo, y desde distintos enfoques metodológicos. Stanford y Smith (1972) relevaron la capacidad de mineralización *in vitro* de 39 suelos de EE.UU., proponiendo el uso de modelos cinéticos para el estudio del proceso. Campbell *et al.* (1991) y Wani *et al.* (1994), entre otros, compararon el efecto de diversos sistemas de cultivo sobre la capacidad de distintos suelos para aportar nitrógeno por mineralización. Más recientemente, Silgram y

Shepherd (1999), en una extensa revisión, analizaron el efecto de los sistemas de labranza y rotaciones de cultivo sobre la mineralización del nutriente.

En lo referente al efecto de las variables ambientales sobre el proceso, y particularmente la incidencia de la humedad edáfica. En general, se acepta que el valor óptimo para la mineralización se halla entre -10 y -33 kPa, detectándose aún mineralización a contenidos hídricos inferiores a la capacidad a la marchitez permanente (Navarro *et al.* 1991, Sierra 1997; Zak *et al.* 1999). Esta generalización, no obstante, no puede ser aplicada en forma directa a cualquier suelo, debido al efecto de la textura y estructura sobre la mineralización del nutriente, ya que el efecto de protección física que inducen ambas propiedades sobre los compuestos orgánicos, puede cambiar según el horizonte considerado, o el estado de degradación estructural en que se halle un dado suelo, tal

como lo demostraron Strong *et al.* (1999), en una serie de trabajos sobre el efecto de la matriz del suelo en la mineralización del nitrógeno edáfico.

La dependencia funcional del proceso de mineralización con la humedad edáfica ha sido planteada también desde diversas aproximaciones matemáticas; Myers *et al.* (1982) y Navarro *et al.* (1991) propusieron relaciones lineales entre el N mineralizado y la proporción del agua útil a la cual se cumple el proceso. Sin embargo, Myers *et al.* (1982) encontraron suelos a los cuales no fue posible aplicar la ecuación lineal, y determinó que en ellos la relación era de tipo cuadrático. Paul *et al.* (2003), por su parte, lograron el mejor ajuste empleando funciones logísticas, lo que sugiere que, también en este aspecto, las generalizaciones deben ser abordadas con cautela.

Por lo expuesto, todo intento de predicción de la cantidad de nitrógeno mineralizado a lo largo del ciclo de un dado cultivo requiere del conocimiento tanto de la cinética que rige el proceso como del efecto que las variables ambientales tienen sobre dicha cinética, siendo la humedad la de mayor impacto en los agroecosistemas. Ello permitiría definir parámetros de entrada en modelos predictivos de disponibilidad del nutriente (Honeycutt 1999, Paul *et al.* 2003), así como evaluar la posibilidad de su eventual acción contaminante de las aguas superficiales y subterráneas.

Bajo la hipótesis de que la evolución temporal de la fertilidad nitrogenada, y su relación con las variables ambientales, responde a cada condición edafo-climática y de manejo del suelo en particular, se plantearon como objetivos de este trabajo: i) establecer las características cinéticas de la mineralización potencial de N en un Haplustol típico de la zona central de la Provincia de Córdoba, y ii) determinar el efecto que tienen sobre la producción de N mineral el contenido hídrico y los años de agricultura continua a que estuvo sometido el suelo.

MATERIALES Y METODOS

La experiencia se llevó a cabo empleando muestras de suelo provenientes de parcelas ubicadas en la localidad de Colonia Almada, Provincia de Córdoba, sobre un suelo Haplustol típico serie Oncativo. Las parcelas eran contiguas, ubicadas a lo largo de una transecta de 500 m, en un terreno topográficamente homogéneo (pendiente <0,5%). Se seleccionaron en base a los años de agricultura continua a que habían estado sometidas, y presentaban la siguiente secuencia histórica:

- Suelo virgen; muestra tomada de una clausura adyacente a las otras parcelas (0 años).
 - Suelo cultivado con soja en siembra directa los dos años previos a la toma de muestras (2 años).
 - Agricultura desde hace 20 años (20 años).
 - Agricultura desde hace 50 años (50 años).
- Las dos últimas han sido cultivadas con las

Tabla 1: Propiedades edáficas de las parcelas sometidas a ensayo: datos promedio de densidad aparente (Dap), pH, materia orgánica (MO), y nitrógeno total (Nt).

Table 1: Soil properties of the plots under assay: means of bulk density (Dap), pH, soil organic matter (MO), and total nitrogen (Nt).

Años de Agricultura	Horiz.	Prof. (cm)	Dap (Mg m ⁻³)	pH	MO (mg g ⁻¹)	Nt (mg g ⁻¹)
0	A	0-22	1,05	7,16	47,5	2,90
	A	0-22	1,20	6,52	47,9	2,60
2	AC	22-52	1,08	7,55	12,9	0,89
	C	+52	1,12	8,45	7,3	0,53
20	A	0-22	1,20	6,10	23,7	1,30
	AC	22-53	1,19	6,71	14,7	0,83
	C	+53	1,18	8,13	7,5	0,60
50	A	0-21	1,18	5,96	18,2	1,05
	AC	21-51	1,28	7,30	9,8	0,69
	C	+51	1,17	8,44	6,4	0,50

normas de manejo y especies tradicionales a la zona (maíz -*Arachis Hypogaea* L.- y soja -*Glycine max* L. Merr.-).

Las muestras se extrajeron en primavera temprana, de acuerdo a lo recomendado por El-Haris *et al.* (1983), para estudios de mineralización potencial. En cada unidad experimental se definieron tres subparcelas, de cada una de las cuales se extrajeron muestras compuestas por 20 submuestras al azar, de los horizontes A, AC y C en las parcelas de 2, 20 y 50 años de agricultura, y del horizonte A en la parcela 0 años de agricultura. Las muestras se secaron al aire, se molieron, y se tamizaron por malla de 2 mm. Sus características analíticas se presentan en la Tabla 1.

Estimación de parámetros de mineralización potencial: las muestras se dispusieron, por triplicado, en tubos de percolación de 50 ml y se dotaron de humedad próxima a capacidad de campo. Se incubaron a 30 °C durante 32 semanas, a fin de evaluar la cinética de mineralización de N en condiciones ambientales óptimas. Las extracciones se realizaron mediante la percolación de 100,0 ml de una solución nutritiva libre de N, compuesta por: CaSO₄·2H₂O 0,002 M; MgSO₄ 0,002 M; K₂SO₄ 0,0025 M; y Ca(H₂PO₄)₂ 0,005 M. Se descartó el extracto del tiempo cero.

Se midió el nitrógeno mineralizado (NO₃⁻ + NH₄⁺), semanalmente durante el primer mes de incubación, y luego cada catorce días.

Determinación de la relación entre la mineralización de N y el contenido hídrico:

Los niveles variables de contenido hídrico se lograron generando en las muestras bajo ensayo distintos potenciales hídricos. Los potenciales fijados fueron -10, -30, -100, -200, -500, -1000 y -1500 kPa, empleando una metodología similar a la utilizada por Cassman y Munns (1980). Para ello se usaron los equipos de olla y membrana de presión, aplicando presiones equivalentes a los potenciales citados. Cuando se alcanzó el equilibrio hídrico para cada valor de potencial, sobre dos submuestras de cada tratamiento se midió gravimétricamente el contenido hídrico; otras tres submuestras (50 g) se colocaron en erlenmeyer de 250 ml, cuya boca se cubrió con "parafilm", y se incubaron a 30 °C durante catorce días. Tanto al inicio como al final del período de incubación se cuantificaron NO₃⁻ y NH₄⁺. El nitrógeno mineralizado (Nmin) en ese tiempo se obtuvo de la diferencia: Nmin = (N-NO₃⁻ + N-NH₄⁺)_{final} - (N-NO₃⁻ + N-NH₄⁺)_{inicial}.

Métodos analíticos: El nitrato inicial y mineralizado se cuantificó con electrodo específico para NO₃⁻ (ORION 93-07), registrando la lectura con un equipo ORION Ionalizer 901 (Mulvaney 1996); amonio se

midió por espectrofotometría visible, con el método del indofenol azul (Mulvaney 1996); pH: por potenciometría (Relación suelo:agua 1:1); materia orgánica: método de Walkley y Black; nitrógeno total: método de Kjeldhal; densidad aparente: mediante cilindro extractor de volumen calibrado.

Métodos de cálculo: Para la estimación de los parámetros cinéticos de la reacción de mineralización, se ajustaron los datos de nitrógeno mineralizado acumulado (Nac) a lo largo de las 32 semanas de incubación, a tres ecuaciones:

a) modelo cinético primer orden, con una única fracción de N potencialmente mineralizable (N₀), que se descompone según una dada constante de velocidad de reacción (k):

$$Nac = N_0 \cdot (1 - e^{-k \cdot t}) \quad (\text{Stanford, Smith 1972})$$

b) modelo cinético primer orden, con dos fracciones de N potencialmente mineralizable (N₁ y N₂), una lábil y la otra recalcitrante, que se descomponen con distintas constantes de velocidad (k₁ y k₂):

$$Nac = N_1 \cdot (1 - e^{-k_1 \cdot t}) + N_2 \cdot (1 - e^{-k_2 \cdot t}) \quad (\text{Deans et al. 1986})$$

c) modelo cinético con una primera etapa de primer orden, con parámetros N₀ y k ya definidos, y una segunda etapa (de larga duración) de orden cero, en la que la producción de N sólo depende de la constante de velocidad (k₀) para esta etapa:

$$Nac = N_0 \cdot (1 - e^{-k \cdot t}) + k_0 \cdot t \quad (\text{Cabrera 1993})$$

A fin de calcular la Tasa Inicial de Mineralización (N₀k), parámetro derivado propuesto por Campbell *et al.* (1991), se usó la derivada primera con respecto al tiempo, de la ecuación de cinética de primer orden:

$$\frac{dNac}{dt} = \frac{N_0 k}{e^{k \cdot t}}$$

la que, para t=0, es la Tasa Inicial de Mineralización:

$$\frac{dNac}{dt} = \frac{N_0 k}{e^0} = N_0 k$$

Métodos estadísticos: Para las correlaciones y regresiones se utilizó SAS (SAS Institute 1989). Los parámetros de los modelos citados se estimaron por iteración numérica, usando el algoritmo Gauss-Newton (procedimiento NLIN de SAS). La calidad del ajuste se comprobó por medio de los gráficos de residuales estudentizados *versus* los valores predichos, por la relación Suma de Cuadrados de la Regresión/Suma de Cuadrados Totales (SCR/SCT), y a través del error estándar asimétrico (EEA) de los estimadores de los parámetros. Se realizó ANOVA

y comparación entre medias, la que se efectuó mediante el test de Tukey. Se aplicaron contrastes específicos empleando técnicas de parametrización en el módulo GLM del mismo programa estadístico.

RESULTADOS Y DISCUSION

Efecto de los años de agricultura sobre la mineralización del nitrógeno

El nitrógeno mineralizado acumulado (Nac) a lo largo de los sucesivos tiempos de incubación tuvo un comportamiento claramente no lineal en todas las muestras analizadas. El ajuste por regresión no lineal al modelo exponencial simple (cinética de primer orden) brindó valores de error estándar asimétrico (EEA) entre 3,5 y 5 para N_0 , y entre 0,001 y 0,003 para la constante k . Para el modelo exponencial + lineal (cinética de primer orden seguida de orden cero), los valores de EEA fueron superiores, con una baja relación SCR/SCT, y gráficos de residuales indicativos de una distribución no aleatoria de las estimaciones. El ajuste al modelo exponencial doble (con dos fracciones de N, de distinta degradabilidad), no fue posible en todas las series de datos, no obteniéndose convergencia aún luego de un elevado número de iteraciones. En las series en las que el ajuste

fue posible, los parámetros N_1 y N_2 estimados se hallaban acompañados de valores de k_1 y k_2 iguales entre sí, indicando que la discriminación obtenida sólo obedecía a razones matemáticas, y que no se detectaba la existencia de fracciones del N orgánico con distinta resistencia a la descomposición.

El tiempo de incubación de 32 semanas fue suficiente para expresar la naturaleza cinética del modelo, como ya fuera demostrado en experiencias realizadas en suelos de la zona (Bachmeier *et al.* 1993, Ringuelet, Bachmeier 2002). El hecho de no detectarse un pool de N mineralizable particularmente labil (detectable en las primeras semanas de mineralización), sumado al gradual patrón de acumulación de Nac en el tiempo, constituyen evidencias de ausencia de un fenómeno de "extramineralización", como el propuesto por Cabrera (1993), atribuido al efecto del proceso de secado y re-humedecimiento de la muestra, que causaría un aumento en la biomasa microbiana muerta, fácilmente descomponible en los primeros períodos de la incubación. Este autor trabajó sobre suelos de régimen hídrico údico, en los cuales la población microbiana se hallaría activa gran parte del año, aunque no indica en qué época se realizó la toma de

Tabla 2: Parámetros de la ecuación de cinética de primer orden $N_{ac} = N_0 \cdot [1 - \exp(-k \cdot t)]$ para los distintos sitios: nitrógeno potencialmente mineralizable (N_0), tasa de mineralización (k), y tasa inicial de mineralización ($N_0 \cdot k$).

Table 2: Parameters of the first order kinetics equation, $N_{ac} = N_0 \cdot [1 - \exp(-k \cdot t)]$, from the different situations: potentially mineralizable nitrogen (N_0), first-order rate constant (k), and initial mineralization rate ($N_0 \cdot k$).

Años de Agricultura	Horizonte	N_0 (mg kg ⁻¹)	k (semana ⁻¹)	$N_0 k$ (mg kg ⁻¹ sem ⁻¹)
0	A	502,6 ^a	0,053 ^a	26,4 ^a
	A	355,5 ^b	0,044 ^{bc}	15,7 ^b
2	AC	238,5 ^e	0,042 ^{cd}	10,0 ^e
	C	206,3 ^g	0,041 ^d	8,6 ^e
20	A	273,4 ^c	0,046 ^b	12,5 ^c
	AC	243,6 ^e	0,046 ^b	11,3 ^d
	C	212,7 ^g	0,045 ^b	9,6 ^e
50	A	258,1 ^d	0,046 ^b	11,8 ^{cd}
	AC	232,1 ^f	0,045 ^b	10,5 ^e
	C	209,7 ^g	0,045 ^b	9,5 ^e

Nota: letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas a $P < 0,01$, entre horizontes y años de agricultura.

muestras. En el caso del suelo estudiado en el presente trabajo, el muestreo de primavera temprana, posterior a un otoño e invierno típicamente secos, habría encontrado a la población microbiana en un estado de latencia natural, propio de estos agro-ecosistemas (Abril *et al.* 1991). El acondicionamiento de las muestras no habría incrementado la cantidad de N orgánico lábil, y, en su posterior incubación, la ruptura del estado de latencia de la población microbiana existente se habría producido en forma gradual.

El comportamiento cinético detectado es coherente con el observado en trabajos previos sobre suelos de la misma área ecológica, aunque sometidos a diferentes prácticas de labranza y secuencias de cultivos (Bachmeier *et al.* 1993). El modelo exponencial simple resultó adecuado para explicar la cinética de la mineralización del N en diversos suelos agrícolas, tal es el caso de lo registrado en los trabajos de El-Haris *et al.* (1983), Campbell *et al.* (1991) y Echeverría *et al.* (1994). Además, Thicke *et al.* (1993) demostraron que la incorporación de N_0 y k en modelos de absorción de N por maíz, en Molisoles del centro de EE.UU., mejora su calidad predictiva. Por todo lo expuesto, se consideró que este modelo cinético es el que mejor describe la mineralización del N “*in vitro*” para las condiciones de este ensayo. Los parámetros de la ecuación exponencial que lo rige se presentan en la Tabla 2; en ésta se detallan los valores de Nitrógeno Potencialmente Mineralizable (N_0), Tasa de Mineralización (k), y tasa de inicial de mineralización ($N_0 k$), para cada historia cultural y horizonte analizado.

Las estimaciones realizadas permitieron detectar que el N_0 del horizonte superficial disminuyó progresivamente al aumentar los años de agricultura (Tabla 2). La “fracción activa” del N total (N_t), representada por el N_0 , disminuyó en un 30 %, aún empleando un sistema conservacionista como lo es la siembra directa. Los valores de N_0 en la parcela de 2 años de cultivo presentaron las mayores diferencias absolutas entre horizontes, mientras que en la parcela de 20 años de agricultura las diferencias ya no fueron tan marcadas (aunque estadísticamente válidas a $P < 0,01$). La parcela con 50 años de cultivo presentó el menor valor en N_0 tanto en el A como en el AC. En general,

se observó que las principales diferencias entre parcelas se concentraron en el horizonte A, cuyas características (Tabla 1) fueron marcadamente alteradas por las prácticas agrícolas. Los horizontes AC y C difirieron entre sí en este parámetro, si bien no mostraron diferencias de relevancia entre parcelas. Soudi *et al.* (1990), trabajando sobre suelos de zonas áridas y semiáridas, observaron tendencias similares al comparar el N_0 de distintas profundidades.

En cuanto a la tasa de mineralización, k , Wani *et al.* (1994) coinciden con Campbell *et al.* (1991), al afirmar que ella depende principalmente del tipo de suelo y del clima dominante. En concordancia con estos antecedentes, los valores estimados para k en este ensayo fueron similares entre parcelas, para cada uno de los horizontes, dado que se trata de la misma serie de suelo (Tabla 2). Sólo se destacó el horizonte A de la parcela virgen, la que tuvo una tasa significativamente mayor ($P < 0,01$) que el resto de las muestras analizadas. En este caso podría especularse que el N_0 de esta parcela posee una importante proporción de formas relativamente más lábiles, ya que al no existir la perturbación de la labranza el medio se torna menos aeróbico, a la vez que se favorece la protección física de los compuestos orgánicos (Strong *et al.* 1999), condiciones que en laboratorio son alteradas y las formas lábiles pueden oxidarse rápidamente. La ruptura del equilibrio biopedológico al incorporarse el suelo a cultivo, conduciría a una rápida degradación del N_0 , tal como se observó en la parcela de 2 años de cultivo. Soudi *et al.* (1990) determinaron una consistente disminución de k en profundidad en diversos perfiles, adjudicándola a la menor biodegradabilidad de los compuestos orgánicos en los horizontes profundos. En las parcelas evaluadas el k decreció con la profundidad, aunque no en forma estadísticamente significativa, impidiendo detectar por esta vía diferencias en la calidad composicional del sustrato mineralizable de los sucesivos horizontes. Por ello, en este suelo el k respondería más a diferencias en el ambiente físico (como condicionante de la actividad microbiana) que a diferencias de sustrato.

Empleando la tasa inicial de mineralización ($N_0 k$), como un indicador combinado de cantidad y calidad del sustrato

Tabla 3: Comparación de medias para nitrógeno mineralizado en 14 días a los valores de potencial aplicados, en el horizonte A de los suelos con distinta historia cultural.

Table 3: Comparison of mineralized nitrogen means during 14 days at the soil water potentials applied in the A horizons of soils with different cropping history

Años Agric.	Potencial hídrico (kPa)						
	-10	-30	-100	-200	-500	-1000	-1500
	N mineralizado (mg kg ⁻¹)						
0	62,2 ^a	47,4 ^a	36,9 ^a	33,2 ^a	28,0 ^a	21,3 ^a	19,2 ^a
2	38,6 ^b	33,7 ^b	26,6 ^b	21,3 ^b	17,2 ^b	12,7 ^b	10,3 ^b
20	24,8 ^c	21,1 ^c	11,9 ^c	9,0 ^c	4,2 ^c	3,1 ^c	2,6 ^c
50	17,0 ^d	13,9 ^d	12,1 ^c	9,6 ^c	8,4 ^c	6,4 ^c	5,7 ^c

Nota: letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas a $P < 0,01$, entre distintos manejos

mineralizable (Campbell *et al.* 1991), se observó que su valor se hallaba fuertemente asociado a los años de agricultura (Tabla 2). Las principales diferencias ($P < 0,01$) se manifestaron a nivel del horizonte A entre las parcelas con 0, 2 y 20 años de agricultura, no difiriendo entre las que tenían 20 y 50 años. Esto sugiere que, superada cierta edad cultural, la fertilidad potencial, evaluada por $N_o k$, alcanzaron un pseudo estado estacionario, a partir del cual los procesos de degradación progresarían con menor intensidad. A nivel de los horizontes AC y C, menos alterados por la pedogénesis, las diferencias absolutas entre parcelas no fueron de una magnitud importante ($\pm 1 \text{ mg N kg}^{-1} \text{ semana}^{-1}$).

El mismo efecto de degradación condujo a que los horizontes A de las parcelas con más años de agricultura tuvieran valores de $N_o k$ muy similares a los de sus respectivos horizontes subyacentes. Lo observado coincide con lo afirmado por Herlihy (1979), en el sentido que los suelos más degradados poseen una menor proporción de formas nitrogenadas lábiles, indicando que los procesos de oxidación y descomposición de la materia orgánica causan, a largo plazo, la pérdida de los compuestos menos polimerizados, siendo los compuestos remanentes más recalcitrantes a la descomposición por mineralización.

En síntesis, los parámetros analizados precedentemente reflejan adecuadamente el efecto de la intensidad de uso de este suelo, coincidiendo con Fabrizzi *et al.* (2003), quienes concluyeron que la capacidad potencial de mineralización es un indicador sensible de

la calidad de un suelo y de los efectos del manejo sobre él.

Relación entre mineralización, años de agricultura y humedad edáfica

Comparando los valores de $N_{\text{mineralizado}}$ en 14 días (N_{min}) de las cuatro situaciones contrastadas se observó cómo la capacidad de mineralización a distintos contenidos hídricos se redujo significativamente ($P < 0,001$) con los años de agricultura, particularmente en los horizontes A y AC (Tabla 3). Similares resultados obtuvieron Eghball *et al.* (1994), al analizar la acumulación de N-NO_3^- hasta 30 cm de profundidad en un ensayo de rotaciones y sistemas de labranza en parcelas de 15 años de agricultura. En el horizonte C las ligeras diferencias detectadas entre años de agricultura no poseen validez estadística, indicando que la perturbación inducida por los años de agricultura no ha alcanzado esa profundidad.

En las parcelas de 0 y 2 años de agricultura se obtuvo una notable mineralización de N en el horizonte superficial aún a contenidos hídricos limitantes para los cultivos (-1000 y -1500 kPa). A modo de ejemplo: en el A del suelo con dos años de agricultura se produjeron, a -1500 kPa, $24,7 \text{ kg N ha}^{-1}$ en 14 días de incubación a 30°C de temperatura. Si se asume un valor de $Q_{10} = 2$ (Campbell, 1983), la relación de la constante de mineralización con la temperatura es

$$k_t = 10^{(8,38 + \log k) - (2580 / ^\circ K)}$$

(Echeverría, Navarro 1978); de allí, la cantidad de N mineralizado en el mismo tiempo, a 20°C

de temperatura edáfica sería de 9,3 kg N ha⁻¹, cantidad del nutriente aún apreciable para ese estado hídrico del suelo. Es posible constatar que en las parcelas de 20 y 50 años los valores estimados, para las mismas condiciones, se reducen aproximadamente a la mitad. Sierra (1997), en un Argiudol típico de Pergamino, estimó una tasa mineralización de 0,5 mg N kg⁻¹ día⁻¹ a -1700 kPa y 25°C, equivalente a 17 kg N ha⁻¹ en 14 días. Zak *et al.* (1999) observaron un fenómeno similar a -1850 kPa, acompañado de un importante valor de respiración microbiana, asignando este hecho a que el contenido hídrico era aún suficiente para permitir el flujo difusional de sustrato metabolizable hacia la microbiota. Como destaca Sierra (1997) el supuesto de algunos modelos de mineralización del N de que el proceso se detiene al alcanzar contenido hídrico de capacidad a la marchitez permanente, sería inválido y obligaría a su replanteo.

La comparación entre medias de N_{min} en los horizontes A, para cada valor de potencial, (Tabla 3) permitió verificar que a -10 y -30 kPa las diferencias entre tratamientos fueron estadísticamente significativas (P<0,01). Estas diferencias se anularon entre las parcelas de 20 y 50 años de agricultura a partir de -100 kPa. Esto contribuye a remarcar el efecto de la humedad edáfica como determinante de la magnitud del proceso de mineralización, ya que cuando el contenido hídrico comienza a ser limitante de la actividad biológica se atenúan las diferencias atribuibles a cantidad y/o calidad de sustrato mineralizable y la restricción al proceso se basa en la accesibilidad de dicho sustrato por los microorganismos (Zak *et al.* 1999).

La variación del N_{min} con el logaritmo del potencial hídrico aplicado resultó lineal aún en los más altos contenidos de humedad (mayores al 100 % de capacidad de campo). Esto difiere de lo observado por Cassman y Munns (1980), Navarro *et al.* (1991) y Drury *et al.* (2003), sugiriendo que en el suelo bajo estudio, y a los contenidos hídricos empleados en esta experiencia, la oxigenación fue suficiente como para mantener la actividad de la microflora nitrificadora. Es de esperar que a un valor de potencial superior a -10 kPa la provisión de aire comience a ser limitante de los procesos biológicos. Este comportamiento lineal ha sido observado por otros autores, pero empleando

para ello un proceso de normalización de variables: N_{min} como una fracción del N_{min} máximo, en función de la proporción de agua útil a la que se cumplió el proceso (Myers *et al.* 1982, Navarro *et al.* 1991, Echeverría *et al.* 1994). El tipo de relación funcional obtenida puede depender de la metodología empleada para lograr el ajuste de humedad, ya sea empleando una técnica de desplazamiento del agua en exceso por presión, o bien adicionando una dada cantidad de agua a las muestras (Cassman, Munns 1980).

Con el objeto de indagar acerca del efecto combinado del sustrato mineralizable y la humedad edáfica sobre el N_{min} a 30°C, se plantearon regresiones múltiples, seleccionando iterativamente el modelo que brindó el mejor ajuste:

$$N_{min} = 0,11 N_o + 0,27 W/W_{max} - 32,6$$

el que tuvo un R²=0,90, con parámetros altamente significativos (P<0,001); en él la humedad se expresó como la proporción entre el contenido actual de agua y la humedad máxima a la que se sometió el suelo (W/W_{max}). Esta función integradora representa adecuadamente el impacto de ambas variables sobre el proceso de mineralización, como se observa en la Figura 1, donde se grafican los valores de

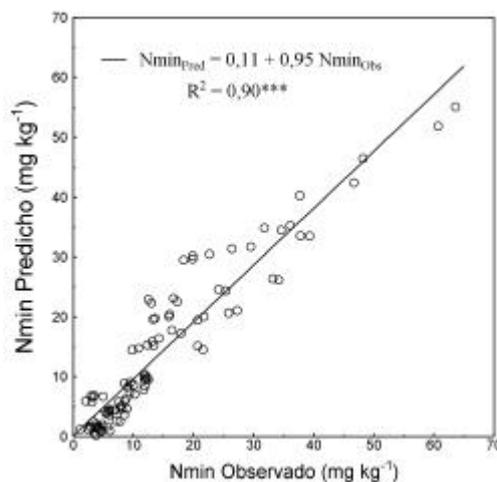


Figura 1: N mineralizado en 14 días (N_{min}_{Pred}) predicho por el modelo $N_{min} = 0,11 N_o + 0,27 W/W_{max} - 32,6$, versus el N mineralizado observado (N_{min}_{Obs}).

Figure 1: N mineralized after 14 days (N_{min}_{Pred}) predicted by the model $N_{min} = 0,11 N_o + 0,27 W/W_{max} - 32,6$ versus observed mineralized N (N_{min}_{Obs}).

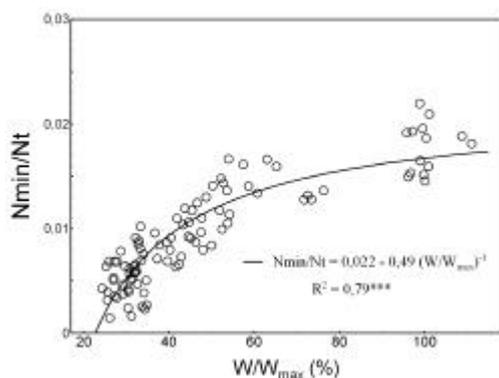


Figura 2: Relación funcional entre el N mineralizado en 14 días, normalizado por N total (Nmin/Nt), y el contenido hídrico relativo (W/W_{max}).

Figure 2: Functional relationship between N mineralized after 14 days, normalized by total N (Nmin/Nt), and relative soil water content (W/W_{max}).

Nmin predichos por el modelo en función de los observados.

A fin de estandarizar la dinámica del proceso de mineralización observada el Nmin se expresó en forma relativa al Nt (Nmin/Nt) para correlacionarlo con la humedad normalizada (W/W_{max}). Esta combinación de variables fue adecuada para representar el efecto del contenido hídrico sobre el proceso de mineralización, en coincidencia con lo observado por Paul *et al.* (2003). El contenido relativo de agua en los horizontes A y AC explicó en un 79 % la mineralización del N en el *solum* del suelo estudiado, independientemente de su historia cultural, cuando el N producido se expresó como una fracción del N total (Figura 2). La función obtenida permite estimar la mineralización de N a 30° C a partir de variables de rutina, fácilmente accesibles analíticamente.

Queda aún por dilucidar el efecto que tiene la temperatura a la cual se cumple el proceso; de esa manera, se modelaría de forma más acabada la incidencia de un factor de *cantidad* (N_0) y de los factores ambientales, sobre la capacidad nitrificadora del Haplustol típico analizado. Ello contribuiría a la elaboración de un modelo predictivo para el proceso de mineralización del N, imprescindible en todo sistema agrícola en vías de intensificación.

CONCLUSIONES

En el Haplustol típico estudiado, representativo de los suelos de la región semiárida central de la Provincia de Córdoba, el proceso de mineralización de N se describe adecuadamente a través de un modelo cinético de primer orden. Los parámetros de este modelo, particularmente el nitrógeno potencialmente mineralizable y la tasa inicial de mineralización, son indicativos de la degradación inducida por los años de agricultura continua.

En las condiciones experimentales impuestas, la mineralización de N en cada horizonte se asocia linealmente con el logaritmo del potencial hídrico edáfico, pudiendo, en el *solum*, generalizarse la relación N mineralizado *versus* contenido hídrico a través del empleo de variables normalizadas. El efecto interactivo de la cantidad de sustrato mineralizable con la humedad, expresada en términos relativos, se puede explicar en un 90 % a través de la función $Nmin = a + bN_0 + c(W/W_{max})$. Además, la expresión $Nmin/Nt = 0,022 - 0,49 (W/W_{max})^{-1}$ permite estimar el N mineralizado a partir de variables analíticas de rutina (Nt y W) aportando información útil para el manejo de la fertilidad edáfica y datos de entrada en modelos de balance de nitrógeno.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Agencia Córdoba Ciencia (SE) y a la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Córdoba el apoyo económico brindado para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- Abril A, Acosta M, Oliva L, Bachmeier OA. 1991. Dinámica estacional de la microflora en suelos de pradera de la región semiárida bajo diferentes manejos agrícolas. *Ciencia del Suelo*. 8(1): 31-39.
- Bachmeier OA, Rollán AA, Núñez Vázquez F, Salas HP. 1993. Mineralización potencial de nitrógeno. Efecto de la materia orgánica, N total y densidad aparente. *Actas XIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*, Mendoza (Arg.), p. 169-170.
- Cabrera ML. 1993. Modelling the flush of nitrogen mineralization caused by drying and rewetting soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 63-66.
- Campbell CA, LaFond GP, Leyshon AJ, Zentner RP, Janzen HH. 1991. Effect of cropping practices on the initial potential rates of N miner-

- alization in a thin Black Chernozem. *Can. J. Soil Sci.* 71: 43-53.
- Campbell CA. 1983. Balance y eficiencia del uso del nitrógeno con énfasis en los suelos de pradera del Canadá. X Congr. Arg. y VIII Latinoamericano de Ciencia del Suelo, Mar del Plata. Actas:13-63.
- Cassman KG, Munns DN. 1980. Nitrogen mineralization as affected by soil moisture, temperature and depth. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:1233-1237.
- Deans JR, Molina JAE, Clapp CE. 1986. Models for predicting potentially mineralizable nitrogen and decomposition rate constants. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 323-326.
- Drury CF, Zhang TQ, Kay BD. 2003. The non-limiting and least limiting water ranges for soil nitrogen mineralization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 1388-1404.
- Echeverría H, Bergonzi R, Ferrari J. 1994. Un modelo para estimar la mineralización de nitrógeno en suelos del sudeste de la Provincia de Buenos Aires (Argentina). *Ciencia del Suelo* 12(2): 56-62.
- Echeverría H, Navarro CA. 1978. Efecto de las temperaturas de incubación sobre la mineralización del nitrógeno orgánico. VIII Reunión Arg. Ciencia del Suelo, Buenos Aires. Actas, p 42.
- Eghball B, Mielke LN, Mccallister DL, Doran JW. 1994. Distribution of organic carbon and inorganic nitrogen in a soil under various tillage and crop sequences. *J. Soil Water Cons.* 49(2): 201-204
- El-Haris MK, Cochran VL, Elliot LF, Bezdicek DF. 1983. Effect of tillage, cropping, and fertilizer management on soil nitrogen mineralization potential. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 1157-1161.
- Fabrizzi KP, Morón A, García FO. 2003. Soil carbon and nitrogen organic fractions in degraded vs. non-degraded Mollisols in Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 1831-1841.
- Herlihy M. 1979. Nitrogen mineralization in soils of varying texture, moisture and organic matter. 1. Potential and experimental values in fallow soils. *Plant and Soil*, 53: 255-267.
- Honeycutt CW. 1999. Nitrogen mineralization from soil organic matter and crop residues: field validation of laboratory predictions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 134-141.
- Mulvaney RL. 1996. Nitrogen – Inorganic Forms. En: Sparks DL (Editor), *Methods of Soil Analysis. Part 3 - Chemical Methods*. Chapter 38. ASA, SSSA, CSSA, Madison WI, p. 1123-1184.
- Myers RJ, Campbell CA, Weier KL. 1982. Quantitative relationship between nitrogen mineralization and moisture content of soil. *Can. J. Soil Sci.* 62: 111-124.
- Navarro C, Echeverría H, Fonalleras M, Manavella F. 1991. Efecto de los contenidos de humedad sobre la mineralización del nitrógeno en suelos del sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo.* 9(1-2): 13-19.
- Paul KI, Polglase PJ, O'Connell AM, Carlyle JC, Smethurst PJ, Khanna PK. 2003. Defining the relation between soil water content and net nitrogen mineralization. *Europ. J. Soil Sci.* 54: 39-47.
- Ringuet A, y O. Bachmeier. 2002. Kinetics of soil nitrogen mineralization from undisturbed and disturbed soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 33(19&20): 3703-3721.
- SAS Institute. 1989. *SAS/STAT Guide for personal computers*. Version 6.03. SAS Institute Inc. Cary, N.C. USA.
- Sierra J. 1997. Temperature and soil moisture dependence of N mineralization in intact soil cores. *Soil Biol. Biochem.* 29(9/10): 1557-1563.
- Silgram M, Shepherd, MA. 1999. The effects of cultivation on soil nitrogen mineralization. *Adv. Agron.* 65:267-311.
- Soudi B, Abderrahmane S, Chiang, CN. 1990. Nitrogen mineralization in semiarid soils of Morocco: rate constant variation with depth. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:756-761.
- Stanford G, Smith JS. 1972. Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Sci.Soc.Am.J.* 36(3): 465-477.
- Strong DT, Sale PWG, Helyar KR. 1999. The influence of the soil matrix on nitrogen mineralisation and nitrification. III. Predictive utility of traditional variables and process location within the pore system. *Aust. J. Soil Res.* 37: 137-150
- Thicke FE, Russelle MP, Hesterman OB, Sheaffer CC. 1993. Soil nitrogen mineralization indexes and corn response in crop rotations. *Soil Sci.* 156(5): 322-335.
- Wani SP, McGill WB, Haugenkozyra KL, Juma NG. 1994. Increased proportion of active soil-N in Breton Loam under cropping systems with forages and green manures. *Can. J. Soil Sci.* 74(1): 67-74.
- Zak DR, Holmes WE, MacDonald NW, Pregitzer KS. 1999. Soil temperature, matric potential, and the kinetics of microbial respiration and nitrogen mineralization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 575-584.