

MINERALIZACION DEL NITROGENO DEL SUELO EN EL CULTIVO DE TRIGO: COMPARACIONES ENTRE METODOS DE CAMPO, LABORATORIO E INVERNACULO

G A MADDONNI, L MARBAN, J H GONZALEZ MONTANER

Cátedra de Cerealicultura, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Av. San Martín 4453 (1417) Buenos Aires. Argentina.

SOIL NITROGEN MINERALIZATION IN WHEAT CROPS: A COMPARISON OF FIELD, LABORATORY AND GREENHOUSE METHODS

Nitrogen mineralization is one of the most difficult process to estimate when attempting to perform a soil nitrogen balance. The different methods developed for its estimation show poor agreement. The objectives of this paper were 1) to estimate nitrogen mineralization using three different methods and 2) to establish the environmental factors responsible for the lack of correlation between them. Nitrogen fertilization experiments in wheat, were conducted in 20 locations in the south east of Buenos Aires Province (Argentina), during 1989 and 1990. Nitrogen mineralization was evaluated in bare soil plots (without crop and without weeds) and correlated with: 1) nitrogen accumulated in laboratory during 8 weeks of incubation and 2) nitrogen uptake by wheat in pots in a greenhouse. The increasing level of control of the environment (field < greenhouse < laboratory) resulted in a better correlation between soil properties (i.e. labil nitrogen and organic carbon content) and nitrogen mineralization. Nitrogen mineralization during 1990 was greater than that observed during 1989, regardless of the method used for its estimation (field method: 71.8 vs. 38.0 kg N ha⁻¹; laboratory method: 88.0 vs. 61.7 mgN kg soil⁻¹; greenhouse method: 194 vs. 97 mgN kg soil⁻¹). The field method did not agree with the other ones, but laboratory and greenhouse methods agreed reasonably well between each other ($r^2=0.59$, $P>0.01$). The influence of mean temperature in the mineralization rates under field conditions resulted in a significant increment of nitrogen mineralization during the wheat growing season. The occurrence of soil water stress at the 3.1 Zadoks stage, apparently determined a mineralization rate lower than the expected potential one.

Key words: Soil nitrogen mineralization-Wheat crops-Field, laboratory and greenhouse methods-Environmental factors

INTRODUCCION

La mineralización del nitrógeno (N) orgánico del suelo es uno de los procesos de mayor dificultad de estimación, cuando se intenta plantear la ecuación del balance de N para el ciclo de crecimiento de un cultivo. Sin embargo este proceso puede ser responsable de las variaciones en la respuesta de los cultivos a la fertilización (Van Keulen 1982). Diferentes investigadores han tratado de caracterizar la oferta nitrogenada del suelo por esta vía de ganancia, proponiendo metodologías las cuales no presentaron resultados satisfactorios. Por ejemplo la determinación del N potencialmente mineralizable (Standford, Smith 1972) ha presentado dificultades de implementación ocasionada por la falta de correlación entre las tasas de mineralización en condiciones de campo y las de laboratorio. Las condiciones de laboratorio determinan tasas de mineralización próximas al óptimo, a diferencia de las imperantes a campo, espe-

cialmente en cultivos de trigo con temperaturas por debajo de los 10 °C, en las etapas iniciales del ciclo. Por estas razones, Standford *et al.* (1973), Navarro *et al.* (1991), Echeverría *et al.* (1994), proponen coeficientes de corrección para predecir las tasas de mineralización en el campo a partir de las estimadas en laboratorio conjuntamente con las condiciones ambientales imperantes a campo en el período considerado. Sin embargo la validación de estos métodos no ha sido demostrada.

Otros autores han propuesto estimar la mineralización del N directamente a campo mediante incubaciones de suelo *in situ* (Zourarakis *et al.* 1987, Clausnitzer 1988, McInnes, Fillery 1989; Hatch *et al.* 1990), por medio del balance de N en parcelas desnudas (Mary 1988, Delphin *et al.* 1991) o por la absorción de N por los cultivos (Sebillote 1985, Taureau 1987). Sin embargo, la capacidad predictiva de estos métodos es muy baja, principalmente porque no consideran las variables que de-

terminan las tasas del proceso de mineralización. Por lo tanto metodologías que se basen en la estimación de la mineralización a partir de tasas potenciales, corregidas según el efecto de variables del ambiente (*i.e.* temperatura, contenido hídrico del suelo), parecería ser la aproximación más promisoría para esta problemática. Asimismo rara vez en nuestro país se han confrontado las mediciones de campo en cultivos de invierno con las estimaciones en condiciones controladas. Resultaría ventajoso poder contrastar estas mediciones y determinar las variables ambientales que alejan las tasas reales a campo de las potenciales. Estos contrastes sería de interés para la elaboración de futuros modelos de simulación de la mineralización en cultivos invernales.

En este trabajo se usaron tres métodos experimentales para estimar la mineralización del N del suelo: condiciones de laboratorio, de invernáculo y de campo. La información obtenida fue analizada para estudiar las relaciones entre los distintos métodos y la influencia de los factores ambientales sobre las mediciones *in situ*.

MATERIALES Y METODOS

Sitios Experimentales

Se condujeron 20 experimentos de fertilización en trigo (*Triticum aestivum*, L.) en el sudeste de la Provincia de Buenos Aires, Argentina (36 ° a 38 ° S, 60 ° a 62 ° O) durante 1989 (9 experimentos) y 1990 (11 experimentos), abarcando los partidos de Tres Arroyos, Necochea, Azul y Coronel Dorrego. En todos los casos los experimentos se realizaron sobre suelos Argiudoles típicos y petrocálicos. Se seleccionaron como sitios experimentales (SE) parcelas con varios años de agricultura y antecesor girasol (*Helianthus annuus*, L.) con la excepción de los SE del departamento de Azul (1 SE con soja (*Glycine max*, L.) y 1 SE con maíz (*Zea mays*, L.). Se utilizó el cultivar de trigo Buck Patación realizándose la siembra entre fines de julio y principios de agosto.

Caracterización de los sitios experimentales

Quince días previo a la fecha de siembra de cada SE, se tomaron muestras de suelo con barreno hasta la profundidad efectiva del perfil, en intervalos de 20 cm. En los Argiudoles típicos la profundidad en análisis fue de 100 cm, mientras que en los petrocálicos se consideró la profundidad hasta la tosca. La muestra de cada profundidad resultó compuesta por 3-4 submuestras tomadas sobre una transecta que atravesaba diagonalmente a cada SE. En dichas muestras se determinaron las siguientes propiedades químicas y físicas de los suelos: nitrógeno orgánico (Richter 1980), carbono orgánico (Richter, Von Wistinghausen 1981), nitrógeno mineral (N-NO₃) (Daniel, Marbán 1989), nitrógeno hidrolizable (Chalk, Waring 1970), pH y contenido de agua a capacidad de campo (Jackson 1964) y textura (Black *et al.* 1965) (Tabla 1). Las temperaturas del aire y las precipitaciones durante el ciclo de los cultivos de trigo, fueron registradas de las estaciones meteorológicas más cercanas.

Mineralización del N del suelo en condiciones de campo (MNC)

En las parcelas de trigo sin fertilizar, se dejaron subparcelas (1 por SE) libres de cultivo y malezas (parcela desnuda) de una

superficie de 10 m². Se tomaron muestras de suelo con barreno, para la determinación del contenido de N mineral (N-NO₃), de acuerdo a la siguiente secuencia: 15 días previo a la siembra, cuando el trigo de la parcela vecina alcanzaba los estadios 1,2 (2 hojas expandidas), 3,1 (principios de encañazón) y 4,5 (floración) de la escala de Zadoks *et al.* (1974). La profundidad involucrada en el muestreo correspondió a la profundidad efectiva de exploración radical. Dentro de cada profundidad la técnica de muestreo fue similar a la explicada en el punto anterior. La fracción de N drenado por debajo del perfil analizado, fue calculada con el modelo de Burns (1976) modificado por González Montaner y Maddonni (1990), validado para el área experimental (1).

$$ND = NM \cdot f \quad (1)$$

$$f = (P / (P + H_2O_{cc} \cdot 100^{-1}))^w$$

donde ND es el N drenado, NM es el N potencialmente drenable (N mineral en la profundidad efectiva del perfil) y f es la fracción de nitrógeno drenado. P es la cantidad de agua (cm) drenante a través del perfil en análisis. H₂O_{cc} es el porcentaje volumétrico promedio del contenido de agua del suelo a capacidad de campo y w es la mitad de la profundidad efectiva.

La mineralización del N entre momentos de muestreo fue calculada a partir de la ecuación (2).

$$MNC = N_{\text{muestra}_i} - N_{\text{muestra}_{(i-1)}} + ND_{(i-1)} \quad (2)$$

$$(\text{kg N ha}^{-1})$$

donde la mineralización del N (MNC) es la diferencia entre el contenido de N mineral de los suelos entre 2 muestreos (N muestra) mas el N drenado durante ese período (ND).

Esta metodología fue propuesta y validada por Mary (1988) y resulta de gran simplicidad de medición y exactitud. Sólo requiere muestrear la disponibilidad de N mineral en la profundidad efectiva del perfil (zona explorada por el sistema radical) y aplicar un modelo de drenaje de nitratos para no subestimar el aporte de la mineralización. Considera despreciable otros procesos de la dinámica del N del suelo (*i.e.* volatilización, denitrificación, fijación).

Mineralización de N en suelos incubados en condiciones de laboratorio (MNL)

Se tomaron muestras de suelo con barreno (0-20 cm) en las parcelas desnudas, 15 días previo a las fechas de siembra. Con estas muestras se realizaron inmediatamente incubaciones aeróbicas durante 60 días en condiciones óptimas de humedad (capacidad de campo) y temperatura (35 °C) según el método descrito por Stanford, Smith (1972). El contenido de N mineralizado (nitratos) fue medido por arrastre de vapor (Bremner, Keeney 1965) en los percolados de CaCl₂ realizados en la 2^a, 4^a y 8^a semana (Sierra 1992). El N mineralizado en condiciones de laboratorio (MNL) fue obtenido por la suma de los tres registros.

Mineralización de N en condiciones de invernáculo (MNI)

Se tomaron muestras de suelo (6 kg) (0-20cm) en las parcelas desnudas, en el estado 1,2 de los trigos vecinos. Las muestras fueron embolsadas para prevenir desecaciones evitándose asimismo la desagregación natural. Se preservaron las muestras en heladera (4°C) hasta el momento de comenzar el ensayo, para reducir la mineralización de N. Una vez muestreados todos los SE, las muestras sin tamizar se dispusieron en macetas de plástico blanco de 2 kg en tres repeticiones por SE. El N mineral inicialmente presente fue removido mediante un lavado con una solución acuosa de 0,01 M CaCl₂ (Stanford, Smith 1972) seguido de agua destilada para remover el exceso de solución. Cada maceta fue regada con agua destilada hasta saturación y pesada

Tabla 1: Nitrógeno total (NT en 0-20cm), carbono orgánico (CT en 0-20cm), nitrógeno mineral a la siembra (NM en la profundidad efectiva), nitrógeno hidrolizable (NDA en 0-20cm), pH (en 0-20 cm), porcentaje volumétrico de agua a capacidad de campo (H_2O_{cc} promedio del perfil) y textura (0-20 cm) en los distintos sitios experimentales (SE)

Año	Part.	SE (g kg ⁻¹)	NT (kgN ha ⁻¹)	CT (mg kg ⁻¹)	NM	NDA (%)	pH	H ₂ O _{cc}	Textura
1989	T	1	1,8	24	148	265	6,1	23,15	Li.arc
	A	2	2,2	26,8	83	304	6,0	26,23	Li.arc
	r	3	1,9	23,1	122	221	6,2	26,53	Li.arc.ar
	r	4	1,6	19,1	61,5	212	6,6	21,72	Li.arc.ar
		5	1,7	21,9	31	221	6,5	24,3	Li.arc.ar
	N	6	1,9	24,9	124	254	6,2	29,9	Li.arc
	e	7	2,3	27,9	60	303	6,1	21,7	Li.arc.ar
	c	8	2,1	23,5	86	279	6,3	23,3	Li.arc
		9	2,3	29,2	191	326	6,1	24,5	Li.arc.ar
1990	Cn	10	1,4	17,7	41	251	6,2	27,1	Li.arc.ar
	Do	11	1,3	16,6	97	206	6,2	24,2	Li.arc.ar
	T	12	2,1	27,1	57	269	7,8	26,4	Li.
	A	13	1,8	27,7	55	282	6,4	29,2	Li.arc
	r	14	1,8	28,3	27	289	6,2	28,3	Li.arc
	r	15	2,6	33,2	107	398	5,9	26,0	Li.arc.ar
	N	16	2,6	35,0	85	382	6,0	25,5	Li.arc.ar
	e	17	2,1	30,8	55	322	6,2	24,3	Li.arc.ar
	c	18	2,1	29,8	25	310	6,2	23,8	Li.arc.ar
	A	19	2,7	38,4	79	417	6,2	32,1	Li.arc
	z	20	3,0	39,0	132	388	6,2	32,9	Li.arc

(Part.: partidos: TArr: Tres Arroyos, Nec: Necochea, CnDo: Coronel Dorrego, Az: Azul)
(Texturas: Li.:limoso, arc.:arcilloso, ar.:arenoso)

a las 24 hs. El peso resultante fue considerado el correspondiente a la maceta con el contenido hídrico del suelo en capacidad de campo. Posteriormente se sembró el cultivar Buck Patacón con una alta densidad y las macetas fueron ingresadas al invernáculo. Se realizaron riegos diarios con agua destilada. Los volúmenes de agua utilizados fueron calculados a partir de las diferencias de los pesos de las macetas entre dos días consecutivos. En el estado 1,2 (escala Zadoks) se raleó dejando por maceta el equivalente a 400 plantas m⁻². Se cosechó la biomasa aérea total a los 1000 grados día desde la siembra (estado 4,5 escala Zadoks) (temperatura base= 0 °C. Suma térmica calculada con las temperaturas del aire registradas en el invernáculo). Cada año el experimento duró aproximadamente 5-6 semanas, siendo la temperatura media para ambos años cercana a los 24 °C. Las muestras fueron secadas a 70 °C durante 72 hs, molidas en un molino de malla fina y determinado el contenido de N en los tejidos (método de Kjeldhal). La absorción de N por el trigo creciendo en macetas en el invernáculo fue estimativa de la mineralización durante el período experimental (Mary, Remy 1979), considerándose despreciable el N residual y el contenido en las raíces. Diferencias entre SE serían atribuibles sólo a condiciones intrínsecas del suelo.

Análisis estadísticos

Las diferencias en la estimación de la mineralización a campo entre años y dentro de cada año entre intervalos de muestreo fueron testeadas mediante una prueba de t en la que los

SE constituyeron las repeticiones. La variabilidad de las estimaciones de la mineralización entre SE fue correlacionada con algunas propiedades del suelo y del ambiente. La comparación de las estimaciones de mineralización entre métodos fue realizada usando matrices de correlación y regresiones lineales.

RESULTADOS Y DISCUSION

Mineralización del nitrógeno del suelo durante la estación de crecimiento del cultivo de trigo en condiciones de campo

La mineralización del N del suelo a campo, estimada cada año como la media de la MNC de los SE, se incrementó significativamente (1989, P<0,10, 1990 P<0,01) desde la siembra de los cultivos (estado 0) hasta la floración (estado 4,5) (Tabla 2). La temperatura media del aire durante el intervalo 0-1,2 (siembra-2 hojas expandidas) (9,8 °C), fue significativamente inferior que la registrada durante el macollaje (intervalo 1,2-3,1) (11,6 °C) (P<0,05) y durante la encañazón (intervalo 3,1-4,5) (16,5 °C) (P<0,001). La temperatura media registrada durante el macollaje fue también significativamente menor a la de la encañazón (P<0,001).

Tabla 2. Mineralización del nitrógeno del suelo en condiciones de campo entre intervalos de muestreo

Año	Mineralización de nitrógeno a campo (kgN ha ⁻¹) Intervalos ZADOKS		
	0-1,2	1,2-3,1	3,1-4,5
1989	3,83b	16,57ab	17,71a
1990	7,46b	30,06ab	34,33a
Promedio	5,82	23,99	26,85

Letras distintas indican diferencias significativas ($P < 0,10$), dentro de cada año, entre intervalos de muestreo. Diferencias entre años, sólo se detectaron para el intervalo 3,1-4,5 ($P < 0,01$)

Diferencias en la MNC entre años fueron sólo significativas ($P < 0,05$) durante el período de encañazón. Ya que las condiciones de precipitación entre años fueron similares (1989: 268 mm cv: 0,06; 1990: 252 mm cv: 0,05) como así también entre SE dentro de cada año, las condiciones térmicas parecerían ser el principal factor condicionante de las variaciones en las tasas de mineralización (Figura 1). La relación encontrada entre las tasas de mineralización y las temperaturas medias del aire del período en análisis resultó significativa ($P < 0,01$). Los valores de tasas de mineralización diarias para el rango térmico entre 10 y 13 °C presentaron un valor medio de 0,524 kgN ha⁻¹ día⁻¹, siendo ligeramente superior al encontrado por Echeverría *et al.* (1994), en suelos de esta zona para igual rango térmico del suelo (0,458 kgN ha⁻¹ día⁻¹), pero en condiciones controladas. Sin embargo utilizando el modelo de Navarro Duymovich *et al.* (1985) que estima la temperatura del suelo en función de la del aire, para suelos de la zona en análisis, el rango térmico que habrían experimentado los SE habría estado comprendido entre 11 °C y 15 °C. Los valores encontrados por Echeverría *et al.* (1994) resultaron en promedio para este último rango de temperaturas del suelo similar al encontrado en las parcelas desnudas (0,50 kgN ha⁻¹ día⁻¹). Es conocido que las tasa de mineralización están profundamente influenciadas por el rango de temperaturas encontradas a campo (Harmsen, Kolenbrander 1965). Este tipo de control parecería ser el factor que determinó las diferencias en la MNC entre SE y años. Esta dependencia de la mineralización con la temperatura ha sido citada por diferentes autores como el causal de las variaciones anuales de este proceso (Clausnitzer 1988, Hatch *et al.* 1990), pero con poca información acerca de la relación cuantitativa entre estas variables.

A partir del modelo de ajuste encontrado, se sugiere que temperaturas medias del aire por debajo de los 10 °C, resultan lo suficientemente bajas como para poder detectar a campo tasas diarias significativas de mineralización.

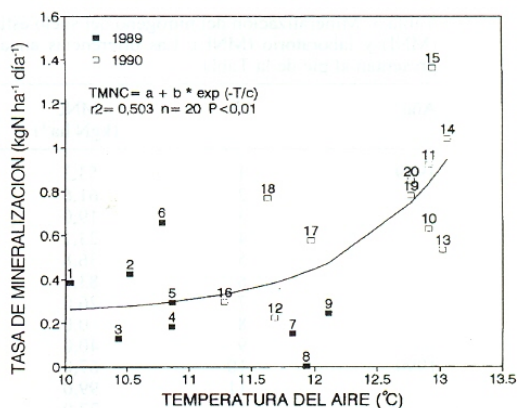


Figura 1. Tasas de mineralización del nitrógeno del suelo en condiciones de campo (TMNC) en función de la temperatura media del aire en el período analizado (T °C). Se incluye en la Figura la ecuación de ajuste

Sería esperable un incremento en la provisión de N del suelo por este proceso durante el crecimiento del cultivo de trigo en función del ascenso en las condiciones térmicas. Las altas tasas de mineralización durante la encañazón podrían explicar la variabilidad encontrada en ensayos de fertilización entre el rendimiento de grano y la disponibilidad de N mineral a la siembra del cultivo (González Montaner, Maddonni 1990), y la respuesta del trigo a la fertilización nitrogenada (Van Keulen 1982).

Comparación entre los métodos utilizados para caracterizar la mineralización del nitrógeno orgánico del suelo

Los valores de N mineralizado en cada SE obtenidos mediante las tres metodologías son presentados en la Tabla 3. Existieron diferencias significativas entre años ($P < 0,001$) en la MNI y MNL. Ya que las estimaciones fueron realizadas ambos años en ambientes controlados con similares regímenes térmicos e hídricos, las diferencias mencionadas serían atribuibles a las propiedades de los suelos de los utilizados en cada año. Los coeficientes de correlación entre las estimaciones de la mineralización y algunas propiedades de los suelos se presentan en la Tabla 4. Cuanto mayor fue el grado del control ambiental (condiciones de campo < cond. invernáculo < cond. laboratorio) mayor resultó el grado de correlación entre la mineralización del N y las propiedades del suelo. La correlación positiva entre el N hidrolizable y MNL resulta de interés ya que Zourarakis *et al.* (1987) no encontraron ninguna asociación entre estas variables. Probablemente el menor rango de N hidrolizable de los suelos analizados por Zourarakis *et al.* (1987) (200-300 mg kg⁻¹) respecto a los aquí testeados (206-417 mg kg⁻¹) sea responsable de esta

Tabla 3. Mineralización del nitrógeno del suelo estimada en condiciones de campo (MNC), invernáculo (MNI) y laboratorio (MNL). Las diferencias anuales, promedio de los sitios experimentales (SE) se presentan al pie de la Tabla

Año	SE	MNC (kgN ha ⁻¹)	MNI (mgN kg suelo ⁻¹)	MNL(2+4+8 semanas) (mgN kg suelo ⁻¹)
1989	1	53,3	120	58,40
	2	61,6	100	78,40
	3	19,0	100	62,50
	4	23,1	100	58,00
	5	36,8	80	59,30
	6	83,1	120	59,70
	7	26,0	70	67,10
	8	0,0	80	56,99
	9	40,0	100	55,03
1990	10	67,0	250	91,73
	11	99,0	140	66,90
	12	27,0	190	88,10
	13	58,0	220	79,90
	14	106,0	190	64,70
	15	139,0	210	104,10
	16	29,1	190	85,40
	17	52,1	160	74,30
	18	69,3	170	72,70
	19	69,0	210	122,70
	20	74,7	200	118,06
Media anual		MNC	MNI	MNL(2+4+8 semanas)
1989		38,0	97	61,70
1990		71,8	194	88,00
		(P<0,05)	(P<0,001)	(P<0,001)

Entre paréntesis se indica la significancia de las diferencias (P)

Tabla 4. Coeficientes de correlación (r) entre algunas propiedades de los suelos (NT: nitrógeno total; CT: carbono orgánico, NDA: nitrógeno hidrolizable y H₂O_{cc}: porcentaje volumétrico de agua del suelo en capacidad de campo) y las estimaciones de la mineralización de nitrógeno en condiciones de campo (MNC), invernáculo (MNI) y laboratorio (MNL)

	NT	CT	NDA	H ₂ O _{cc}
MNC	0,05 (ns)	0,20 (ns)	0,29 (ns)	0,39 (ns)
MNI	0,18 (ns)	0,38(P<0,1)	0,45(P<0,05)	0,57(P<0,01)
MNL	0,63 (P<0,01)	0,67(P<0,01)	0,74(P<0,01)	0,71(P<0,01)

Entre paréntesis se indica la significancia de las diferencias (P). ns: diferencias no significativas

discrepancia. La MNL obtenida en nuestros experimentos también presentó una correlación positiva con el contenido de carbono orgánico de las muestras y con el contenido de agua a capacidad de campo, probablemente debido a la correlación entre estas dos últimas variables ($r = 0,52$). La relación entre el contenido de carbono orgánico y el N mineralizado estimado por incubaciones en laboratorio fue citado para diferentes tipos de suelo (Saint-Fort *et al.* 1990; Klemmedson, Wienhold 1992, Simmard, N'dayegamiye 1993, Goovaerts, Chiang

1993). La mineralización potencial del N estimado en condiciones de laboratorio resultó relacionada a la fracción hidrolizable del N orgánico y al contenido de carbono orgánico de los suelos testeados. Con la excepción de los SE número 10 y 11, los SE de 1990 presentaron los mayores contenidos de estas variables, lo que podría haber determinado las mayores tasas de mineralización de los sitios de 1990 con respecto a los de 1989, en condiciones de laboratorio.

La MNI aunque con mayor debilidad que la MNL, presentó correlaciones positivas y significativas con las propiedades del suelo analizadas. Resulta curioso que a pesar de la menor temperatura imperante en el invernáculo respecto a la del laboratorio (24 °C vs 35 °C), los valores estimados de mineralización resultaron superiores. Se podría sugerir un efecto positivo del cultivo sobre la mineralización, aunque no se debería descartar el aporte nitrogenado realizado por las semillas de trigo utilizadas como simiente en los ensayos de invernáculo (Mary, com. pers.).

No existieron correlaciones significativas entre las propiedades estudiadas del suelo y la MNC. Las condiciones térmicas y/o la ocurrencia de déficit hídricos temporarios pueden alterar las tasas de mineralización, siendo los principales factores que gobiernan este proceso (Clausnitzer 1988, Hatch *et al.* 1990). Este tipo de variación habría sido minimizada con un mayor control del ambiente (*e.g.* condiciones de laboratorio). Por lo tanto parecería ser que la variabilidad encontrada en las MNC, podría ser mejor explicada por las condiciones ambientales que por las propiedades químicas del suelo. Esto ocasionaría la baja correlación entre las estimaciones a campo y las estimaciones en ambientes controlados (MNC vs MNI: $r=0,52$, $P>0,05$; MNC vs MNL: $r=0,39$, $P>0,10$). Por el contrario la correlación entre MNI y MNL fue razonablemente alta ($r=0,74$, $P>0,01$). Similares desacuerdos entre las mineralizaciones de ambientes controlados con los de campo fueron citados por

otros autores extranjeros (Griffin, Laine 1983, Saint-Fort *et al.* 1990, Delphin *et al.* 1991).

La relación lineal entre MNC y MNI aunque significativa, presentó una pobre explicación de la variabilidad de las MNC entre SE (Figura 2). La existencia de algunos SE mostrando una relación lineal entre ambos métodos (SE número 2, 5, 6, 7 y 11) probablemente indicaría una menor limitación del ambiente a los procesos de mineralización tal como lo señalara Delphin *et al.* (1991). La existencia de SE por debajo de la regresión indicaría una mayor reducción de las condiciones potenciales causada por factores limitantes. La Figura 3 presenta la diferencia entre la MNC real de cada SE y la MNC potencial (predicha por la regresión de la Figura 2) en función del contenido de agua del suelo (expresado como fracción del contenido volumétrico a capacidad de campo, prof: 0-20 cm) al comienzo de la encañazón (estado 3,1 Zadoks). Este momento del ciclo del trigo fue elegido ya que las diferencias entre años en la MNC solamente fueron significativas en el intervalo de muestreo 3,1- 4,5 (Tabla 2). La relación obtenida es significativa ($P>0,01$) aunque el coeficiente de determinación no resultó elevado ($r^2=0,366$). Se evidencia que los sitios de 1989, que presentaron menores tasas de mineralización probablemente debido a las menores temperaturas imperantes, se encuentran relativamente cerca de las mineralizaciones potenciales (diferencias menores a 40 kgN ha^{-1}) estimadas bajo condiciones de

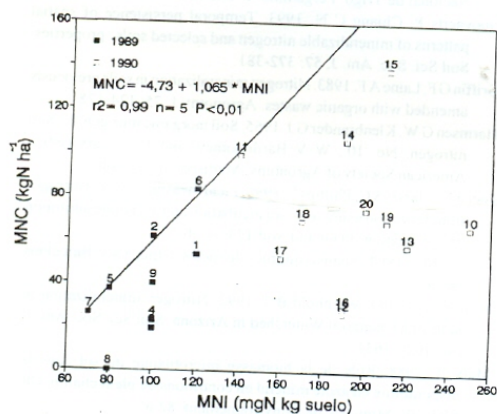


Figura 2. Mineralización del nitrógeno del suelo estimada en condiciones de campo (MNC) en función de su estimación en condiciones de invernáculo (MNI). La función dibujada asume que los sitios experimentales 2, 5, 6, 7 y 11 se encuentran en la linealidad de la correspondencia entre las dos variables

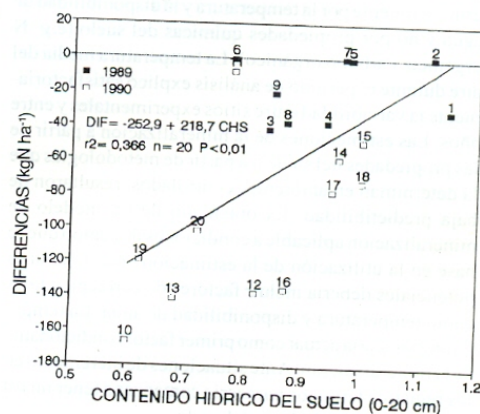


Figura 3. Diferencias (DIF) entre la mineralización del nitrógeno estimada en condiciones de campo y la calculada con la regresión presentada en la Figura 2 ($MNC = -47,3 + 1,065 MNI$) en función del contenido hídrico del suelo (CHS) (en 0-20cm) expresado como fracción del retenido a capacidad de campo, en el estado 3,1 Zadoks del trigo (principios de encañazón). Se incluye la ecuación de la línea de regresión

vernáculo (temperaturas medias 24 °C y sin limitación hídrica). Por el contrario los SE de 1990 (a excepción del SE 11), en los que se registraron mayores temperaturas, el factor hídrico parecería ser el condicionante del mayor alejamiento de las condiciones potenciales (diferencias mayores a 60 kgN ha⁻¹). Por lo tanto parecería existir una colimitación térmico-hídrica sobre la mineralización a campo, tornándose más crítica la limitante hídrica cuanto menor es la limitante térmica. Evidencias que señalan a la disponibilidad de agua como factor limitante de la mineralización han sido presentadas por Navarro *et al.* (1991) y Echeverría *et al.* (1994) en suelos de la misma área geográfica, para condiciones controladas (laboratorio). Como se mencionara anteriormente para nuestros datos, las precipitaciones durante el intervalo 0-4,5 resultaron similares entre SE y años. Por lo tanto es evidente que las diferencias en la disponibilidad hídrica del suelo en 3,1 podrían ser explicadas por cambios en la captación y almacenamiento de agua o por una distinta distribución de las lluvias. Así durante 1989, para el intervalo 0-3,1 se registró en promedio el 58,9 % (CV 0,07) de las precipitaciones acontecidas en el intervalo 0-4,5. Por el contrario durante el intervalo 0-3,1 de 1990, sólo se registró el 26,7 % (CV: 0,067) de las precipitaciones acontecidas entre 0 y 4,5 explicando las menores disponibilidades de agua de principio de encañazon.

En conclusión, la mineralización del N orgánico del suelo en condiciones de campo estaría limitada principalmente por la temperatura y la disponibilidad de agua y no por propiedades químicas del suelo (*e.g.* N orgánico, carbono orgánico). La temperatura media del aire durante el período de análisis explicó satisfactoriamente la variabilidad entre sitios experimentales y entre años. Las estimaciones de la mineralización a partir de las propiedades del suelo o a partir de metodologías que la determinan en ambientes controlados, resultaron de baja predictibilidad. La obtención de un modelo de mineralización aplicable a condiciones de campo que se base en la utilización de la estimación en condiciones potenciales debería incluir factores de corrección tales como temperatura y disponibilidad de agua. La temperatura parecería actuar como primer factor condicionante de la mineralización. Ante situaciones de incremento en los registros térmicos parecería comenzar a tener un rol decisivo la oferta hídrica del suelo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la empresa Cargill S.A., división fertilizantes por el apoyo económico para la realización de este proyecto. Así también les estamos agradecidos al personal del laboratorio LAQUIGE, por

su excelente asistencia técnica y a R Benech Arnold y a M E Otegui por la revisión de este manuscrito.

REFERENCIAS

- Black C A (Ed). 1965. Methods of soil analysis. Part 1. 2 nd Edition. Agronomy 9. 770 p
- Bremner J, Keeney D. 1965. Steam distillation methods for determination of ammonium, nitrate and nitrite. *Anal. Chem. Acta* 32: 485-495
- Burns I G. 1976. Equations to predict the leaching of nitrate uniformly incorporated to a known depth or uniformly distributed throughout a soil profile. *J. Agric. Sci. Camb.* 86: 305-313
- Chalk P M, Waring S A. 1970. Evaluation of rapid tests for assessing N availability in wheat soils. I: correlation with plant indices of availability obtained in pot culture. *Aust. Journ. Exp. Ag. An. Husb.* 10: 298-305
- Clausnitzer I. 1988. Mineralización del nitrógeno en suelos de algunas formaciones vegetales del noroeste de Venezuela. *Turrialba* 38: 223-229
- Daniel P, Marbán L. 1989. Adaptación de un método espectrofotométrico reductivo para la determinación de nitratos en extracto de suelos. *Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Boletín Informativo* 58: 3-8
- Delphin J E, Chapot J Y, Schoellen A. 1991. Relations entre le pouvoir mineralisateur des sols et la mineralisation nette de l'azote au champ. *Agronomie* 11: 439-445
- 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: 56-62
- Gonzalez Montaner J H, Maddonni G A. 1990. Nitrógeno disponible en el suelo durante el período presembrado floración como explicativo el número de granos en el cultivo de trigo. II Congreso Nacional de Trigo. Pergamino. I: 142-151
- Goovaerts P, Chiang C N. 1993. Temporal persistence of spatial patterns of mineralizable nitrogen and selected soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 372-381
- Griffin G F, Laine A F. 1983. Nitrogen mineralization in soils previously amended with organic wastes. *Agronomy J.* 75: 124-128
- Harmsen G W, Klenbrander G J. 1965. Soil inorganic nitrogen. En *Soil nitrogen*, No. 10., W V Bartholomew and F E Clark (eds.), American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin
- Hatch D J, Jarvis S C, Phillips L. 1990. Field measurements of nitrogen mineralization using soil core incubation and acetylene inhibition of nitrification. *Plant and Soil* 124: 97-107
- Jackson M L. 1964. Análisis químico de suelos. Omega SA. Barcelona 662 p
- Klemmedson J O, Wienhold B J. 1992. Nitrogen mineralization in soils of a Chaparral Watershed in Arizona. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1629-1634
- Mary B. 1988. Role de la biomasse microbienne du sol dans la disponibilité en azote mineral en conditions de plein champ. CR SRETIE, Ministère de l'Environnement. 82 p.
- Mary B, Remy J. 1979. Essai d'appréciation de la capacité de mineralisation de l'azote des sols de grande culture. I. Signification des cinétiques de mineralisation de la matière organique humifiée. *Ann. Agron.* 30: 513-527
- McInnes K J, Fillery I R P. 1989. Modeling and field measurements of the effect of nitrogen source on nitrification. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 1264-1269

- Navarro C, Echeverria 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: 13-19
- Navarro Duymovich M, Della Maggiora A, Vidal N. 1985. Estimación de la temperatura media mensual del suelo en función de parámetros climáticos, para Balcarce (Buenos Aires). Guía de Trabajos prácticos. Cátedra de Climatología y Fenología. Unidad Integrada FCA-INTA Balcarce
- Richter M. 1980. Mejoras en la determinación de amonio por destilación. *Rev. Fac. de Agron.* 1: 1-9
- Richter M, Von Wistinghausen E. 1981. Unterscheidbarkeit von Humusfraktionen in Böden bei unterschiedlicher Bewirtschaftung. *Z. Pflanzenenernähr.* Baden 144: 395-406
- Saint-Fort R, Frank K D, Schepers J S. 1990. Role of nitrogen mineralization in fertilizer recommendations. *Commun. in Soil Sci. Plant Anal.* 21: 1945-1958
- Sebillote M. 1985. Roles de l'azote dans le comportement d'un peuplement de céréales. Reflexions sur les approches de l'agronome. *C. R. Acad. Agric. de France* 71: 292-301
- Sierra J. 1992. Relationship between mineral N content and N mineralization rate in disturbed and undisturbed soil sample incubated under field and laboratory conditions. *Aust. J. Soil Res.* 30: 477-492
- Simard RR, N'dayegamiye A. 1993. Nitrogen mineralization potential of Meadow soils. *Can. J. Soil Sci.* 73: 27-38
- Stanford G, Smith S J. 1972. Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil. Sci. Soc. Am. Proc.* 36: 465-472
- Stanford G, Frere MH, Schwaninger DH. 1973. Temperature coefficient of soil nitrogen mineralization. *Soil Sci.* 115: 321-323
- Taureau J. 1987. Approche de l'offre en azote du milieu par les expérimentations au champ. *C. R. Acad. Agric. de France* 73: 81-90
- VanKeulen H. 1982. Graphical analysis of annual crop response to fertilizer application. *Agr. Systems* 9: 113-126
- Zadoks J C, Chang T T, Konzak C F 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed research* 14: 415-421
- Zourarakis D, Urricariet S, Sierra J, Barberis L. 1987. Medición de la capacidad de nitrificación mediante la técnica de incubación in situ en suelos cultivados con maíz. *Rev. Fac. Agr.* 8: 101-114