Estimación del aporte de nitrógeno del suelo para la fertilización racional de cultivos*

Benintende, María C.**; De Battista, Juan J.***, Benintende, Silvia M.**; Saluzzio, Mariano F.**; Muller, Cristian**, Sterren, María A.**

Resumen
El método del balance para diagnóstico de fertilidad nitrogenada requiere una estimación relativamente ajustada del aporte por mineralización. Partiendo de la hipótesis que el empleo del nitrógeno potencialmente mineralizable (N_0) permitirá estimar los aportes del N del suelo y así ajustar las dosis de fertilizante nitrogenado, buscamos técnicas analíticas para una estimación rápida. La técnica de incubaciones anaeróbicas de 7 días (N-IA) fue la que permitió un mejor ajuste con el N_0 (R^2= 0,735), y permitiría efectuar estimaciones razonables de N_0 en función del N-IA. El modelo lineal ajustado fue N_0 = 1.1305 N-IA + 55,275. Los N_0 determinados oscilaron entre 95 y 247 mg de N kg^{-1} de suelo y representaron entre 6% y 12% del N total. El aporte por mineralización de las capas subsuperficiales observado fue de aproximadamente 43% del N que se mineraliza en el horizonte superficial. Al comparar mineralización de N con y sin labranza, se observó una diferencia de 2ºC durante el ciclo del cultivo de maíz.

Palabras clave: Agrociencias, mineralización del nitrógeno, técnicas analíticas, estimación de N_0

*) Artículo que expone resultados del PID UNER Nº 2058, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Entre Ríos (Oro Verde, Argentina), durante 1999-2004, financiado por la SICTFRH, UNER; Directores: Ing. Agr. María C. Benintende e Ing. Agr. Juan J. De Battista; recibido en agosto de 2007 y admitido en abril de 2008.
**) Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Entre Ríos, Oro Verde (Argentina). crisben@fca.uner.edu.ar
***)Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria (EEA) de Concepción del Uruguay (Argentina).

Exact and Natural Sciences
Research

Soil Nitrogen Supply Estimation for Rational Fertilization*

Benintende, María C.**; De Battista, Juan J.***, Benintende, Silvia M.**; Saluzzio, Mariano F.**; Muller, Cristian**, Sterren, María A.**

Abstract
Balance method applied to nitrogen fertility diagnosis needs an estimation of the quantity of N supplied by the mineralization process. From the hypothesis that the potentially mineralizable nitrogen (N_0) allows estimations of N supply therefore adjusting N fertilizer quantities, we tended to find analytical techniques to make possible speedy N_0 estimation, so that they could be used for diagnostic purposes. Seven days anaerobic incubation (N – IA) performed the best adjustment with N_0 (R^2 = 0.735) and will allow good N_0 estimations from N – IA values. The adjusted lineal model found was: N_0 =1.1305 N – IA + 55.275. The N_0 found in our experiments ranged from 95 to 247 mg of N kg^{-1} and represented between 6 to 12% of the total N. In addition, we found that sub-superficial layers mineralized almost 43% of the quantities mineralized in the superficial one. Comparing direct drilling *vs* ploughed soils, we found that soil temperature in direct drilling was 2ºC lower than in ploughed soils during a maize cycle.

Key words: Agricultural Sciences, N mineralization, analytical techniques, N_0 estimation

*) This paper derives from the research project # 2058, Faculty of Agricultural Sciences, Universidad Nacional de Entre Ríos -UNER (National University of Entre Ríos) (Oro Verde, Argentina), lead during 1999-2004, funded by SICTFRH, UNER, directed by Agr. Eng. María C. Benintende and Agr. Eng. Juan J. De Battista; received in August 2007; admitted in April 2008.
**)Faculty of Agricultural Sciences, Universidad Nacional de Entre Ríos -UNER (Oro Verde, Argentina) crisben@fca.uner.edu.ar
***) Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria (EEA) at Concepción del Uruguay (Concepción del Uruguay, Argentina).

I. Introducción

El método del balance para diagnóstico de fertilidad nitrogenada tiene gran difusión entre los técnicos que trabajan en la actividad privada en nuestra zona y, para su utilización, frecuentemente se encuentran con el inconveniente de falta de datos provenientes de estudios locales que permitan una estimación relativamente ajustada del aporte por mineralización. Partiendo de la hipótesis de trabajo que el empleo del nitrógeno potencialmente mineralizable (N_0) permitirá estimar los aportes de N del suelo y, en consecuencia, ajustar las dosis de fertilizante nitrogenado, se consideró necesario encontrar técnicas analíticas que permitieran estimar ese valor en forma rápida a fin de ser utilizadas como técnicas de diagnóstico.

Los objetivos planteados fueron: a) estimar los aportes de N del suelo a través de la mineralización durante el ciclo de crecimiento de los cultivos, para calcular las dosis de fertilizante a aplicar, y b) utilizar técnicas analíticas alternativas más expeditivas y económicas para esa estimación, que posibilitaran su utilización con fines de diagnóstico. Para su cumplimiento se realizaron ensayos y determinaciones a campo durante el período 2000 - 2003, en lotes ubicados en los departamentos Paraná y Diamante de la Provincia de Entre Ríos (Argentina). Las determinaciones de laboratorio fueron realizadas en el Laboratorio de Microbiología de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la UNER.

II. Determinación de la capacidad de mineralización de N del suelo

Se han desarrollado diversos métodos para estimar la cantidad de N que se mineralizará durante el ciclo de los cultivos y las tasas a las que este proceso ocurre, o sea, la capacidad de aporte de N de un suelo determinado (**Stanford y Smith**, 1972; **Oyanadel y Rodríguez**, 1977; **Stanford**, 1982). El método propuesto por **Stanford y Smith** (1972) permite estimar el potencial de mineralización de N del suelo (N_0), que se calcula a partir del N mineralizado acumulado en 4, 8, 12, 16 y 20 semanas de incubación. La estimación del N_0 se basa en la utilización de los conceptos biológicos básicos que hacen que la misma sea la mejor y la

menos empírica para estimar el suministro de N de los suelos (**Campbell *et al***. 1981).

Los potenciales de mineralización determinados en los diferentes trabajos realizados en este Proyecto oscilaron entre 247 mg de N kg $^{-1}$ de suelo en el caso de un suelo Vertisol, con varios años de siembra directa y 95 mg de N kg $^{-1}$ de suelo para un suelo Argiudol vértico muy degradado por la erosión hídrica. En la **Tabla 1** se presentan valores medios de variables edáficas determinadas durante la ejecución del estudio.

Tabla 1: C orgánico, N total y N potencialmente mineralizable (N0) en suelos de la Provincia de Entre Ríos

Suelo	Carbono orgánico (%)	N total (%)	N0 (mg.kg.-1)
Vertisol (Peluderte)	2,60	0,161	195
Vertisol (Peluderte)	2,50	0,215	247
Vertisol (Peluderte)	2,09	0,175	151
Vertisol (Peluderte)	2,09	0,186	165
Molisol (Argiudol ácuico)	1,89	0,164	136
Molisol (Argiudol ácuico)	1,79	0,154	183
Molisol (Argiudol ácuico)	1,97	0,178	180
Molisol (Argiudol vértico)	1,87	0,170	104
Molisol (Argiudol vértico)	1,87	0,177	205
Molisol (Argiudol vértico)	2,18	0,173	154
Molisol (Argiudol vértico)	1,30	0,124	113
Molisol (Argiudol vértico)	1,01	0,084	101
Molisol (Argiudol vértico)	1,43	0,103	95

II.1. Ajuste de valores de N_0 por factores de ambiente (temperatura y humedad) durante el período de desarrollo del cultivo

Una vez estimado el N_0, el valor se afecta por factores del ambiente durante el ciclo del desarrollo de un cultivo a fin de estimar el N que podría mineralizarse en ese período.

En condiciones de campo, la mineralización del N va a estar controlada fundamentalmente por 2 factores: la temperatura y la humedad

del suelo; que varían según el clima, tipo de suelo y el ciclo de desarrollo de los cultivos. (**Oyanadel y Rodríguez**, 1977):

$$\mathbf{N_m = N_0 * [exp.\ (2{,}3\ (7{,}71 - 2758/T))] * (1{,}11\ \theta/\theta_0 - 0{,}138)}$$

Donde:

$\mathbf{N_m}$ = N mineralizado.

$\mathbf{N_0}$ = N potencialmente mineralizable.

T = temperatura edáfica en grados Kelvin. (ºK)

θ = contenido volumétrico de agua.

θ_0 = contenido volumétrico de agua óptimo para la mineralización. (0,7 *CC.) (**Cavalli y Rodríguez**,1975)

De esta manera, la cuantificación del N_0 a través de la metodología propuesta por **Stanford y Smith** (1972) permite estimar el N mineralizado en condiciones de campo, corrigiendo los valores obtenidos de N_0 por los factores de temperatura y humedad. En consecuencia, se obtiene el N que se mineralizó durante el período de desarrollo de un determinado cultivo.

II.1.1. Estimación del N mineralizado durante el ciclo de diferentes cultivos de acuerdo a condiciones ambientales y sistemas de laboreo utilizados

Se analizan y comparan algunos resultados de estas evaluaciones. En un trabajo realizado en un suelo Molisol (Argiudol ácuico), con un N_0 de 183 mg kg^{-1} suelo, durante el ciclo de un cultivo de maíz en el que las temperaturas del suelo en el horizonte superficial oscilaron entre 16 y 28ºC y la humedad entre el 72 y el 99% de la óptima para el proceso de mineralización, se estimó que el N mineralizado a campo en ese período fue de 112 kg N ha^{-1}. Esta cantidad representó el 22% del N_0 y aproximadamente el 3% del N total. Como referencia, las estimaciones de cantidades de N mineralizado durante el ciclo de un cultivo de maíz variaron entre 13 y 131 kg N ha^{-1} en Nebraska (**Saint-Fort** *et al*. 1990, citado por **Cabrera** 2000) y entre 50 y 123 kg N. ha^{-1} en Japón (**Saito, Ishii**, 1987, citado por **Cabrera** 2000).

Durante el ciclo de un cultivo de lino en un suelo Argiduol vértico, el N_0 fue de 154 mg kg^{-1} de suelo y el N mineralizado fue de 63 kg N ha^{-1}

en el horizonte superficial y representó el 15% de N_0. Las temperaturas del suelo a esta profundidad oscilaron entre 12 y 24 ºC y la humedad entre el 80 y el 99% de la óptima para el proceso de mineralización.

Para el período de desarrollo de un cultivo de trigo en un suelo Argiudol vértico, se estimó una mineralización de 54 kg N ha^{-1}en el horizonte superficial. El N_0 fue de 104 mg kg^{-1} suelo y la cantidad de N mineralizado representó el 19% del N_0. Las temperaturas del suelo a esa profundidad oscilaron entre 14 y 22ºC y la humedad entre el 70 y el 88% de la óptima para el proceso de mineralización. Para el mismo cultivo, en un suelo Peluderte argiudólico con N_0 de 151 mg kg^{-1} de suelo, se estimó una mineralización de 55 kg N ha^{-1} Esta cantidad representó aproximadamente el 18% del N_0.

Asimismo, **Cabrera** (2000) cita estimaciones de N mineralizado realizadas por **Campbell** *et al*. (1988) en suelos de Canadá que van de 52 kg N ha^{-1} en cultivo de secano a 81 kg N ha^{-1} en cultivos bajo riego.
Estos resultados muestran una amplia variación de las estimaciones y que, en muchos casos, el N mineralizado a partir de la materia orgánica representa una proporción importante de la cantidad requerida para los cultivos (**Cabrera**, 2000).

II.1.2. Efecto de las labranzas

Los factores que alteran las condiciones de equilibrio de los ecosistemas tienden a provocar modificaciones en las propiedades de los suelos, entre las cuales merecen especial atención las que se producen sobre las condiciones biológicas. Las alteraciones de los procesos en los cuales la población microbiana está involucrada, principalmente la descomposición de residuos orgánicos y la dinámica de los nutrientes del suelo, inciden en la productividad agrícola (**García y Morón**, 1992). Una de las alteraciones que provoca consecuencias más drásticas sobre el suelo es la aplicación de diversos sistemas de labranzas que tienen diferentes efectos ecológicos, fundamentalmente relacionados a la aireación, régimen térmico, fertilidad del suelo y, particularmente, a la fertilidad nitrogenada.

En un trabajo realizado sobre un suelo de textura arcillosa de Entre Ríos,

Benintende *et al.* (2000) compararon sistemas de labranza convencional y siembra directa de 2 años de aplicación, con campo natural, que se tomó como una situación de equilibrio. En la **Tabla 2** se presentan los valores medios de C y N de biomasa microbiana, N_0 y población de Nitritadores y Nitratadores en tres sistemas de manejo. Como puede observarse en la misma, el C de la biomasa microbiana fue más bajo en los dos sistemas de manejo que en el campo natural, sin diferencias significativas entre siembra directa y labranza convencional. En el campo natural esta variable presentó valores bajos en relación con los encontrados en otros trabajos realizados por el grupo de investigación (**Benintende y Benintende,** 1995).

Tabla 2: C y N de biomasa microbiana (CBM y NBM), N potencialmente mineralizable (N0) y población de Nitritadores y Nitratadores en tres sistemas de manejo

	Labranza convencional	Siembra directa	Campo Natural
CBM (mgkg-1)	394.5b	422.5b	507.0a
NBM (mgkg-1)	50.3b	70.2a	54.4b
CBM/NBM	8.3	6.0	9.8
N_0 (mg kg-1)	195.0c	250.0b	276.0a
Nitritadores (gérmenes.g-1)	2,4.103	1,5.104	1,1.103
Nitratadores (gérmenes.g-1)	2,7.102	1,9.104	3,2.102

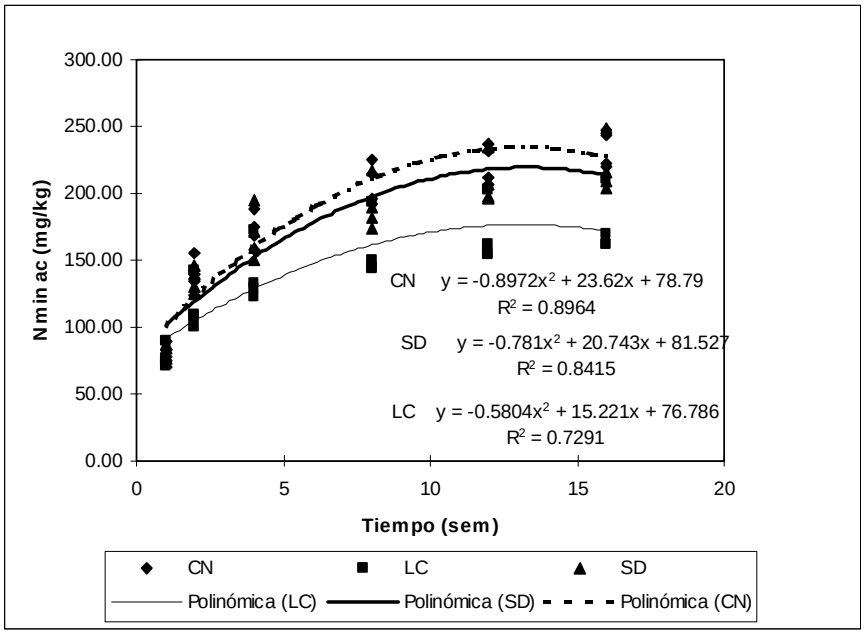
Nota: Valores seguidos de igual letra no presentan diferencias significativas LSD (a=0.05)

La población de nitrificantes del suelo presentó valores mayores en siembra directa. Probablemente, en la labranza convencional, la remoción disminuyó el número de bacterias pertenecientes a este grupo fisiológico, en tanto que en el sistema campo natural haya una menor aireación por compactación natural del suelo. Cabe recordar que la siembra directa en la situación muestreada contaba con 2 años de aplicación y no presentaba aún problemas de densificación superficial.

En la **Figura 1** se presenta la evolución del N mineralizado acumulado en el tiempo de incubaciones para las tres situaciones evaluadas. Se presenta además el ajuste de cada una de las curvas a un modelo

polinómico. Las tres situaciones presentaron una cantidad de N inicial similar, pero a las dos semanas de incubación comenzaron a diferenciarse. Esta diferencia se hizo más importante en el N mineralizado en la muestra proveniente de labranza convencional que representó un 75% de campo natural, en tanto que en siembra directa la proporción fue de 94%. El N mineralizado acumulado en 4 meses representó alrededor de un 10% del contenido de N total.

Figura 1: N mineralizado acumulado en incubaciones aeróbicas de largo plazo en Campo Natural (CN), Labranza Convencional (LC) y Siembra Directa (SD)



II. 2. Aporte de N mineralizado en los horizontes subsuperficiales

La capacidad de mineralización de los distintos horizontes en un perfil de suelo presenta diferencias importantes. El N orgánico del suelo disminuye con la profundidad (**Darwich**, 1998), por lo que es esperable que

ocurra lo mismo con el N mineralizable. **Borgetto** *et al.* (1994), quienes realizaron incubaciones aeróbicas de muestras de los horizontes de dos perfiles de suelo, un Molisol similar a Serie Tezanos Pinto (Plan Mapa de Suelos INTA- Gobierno de Entre Ríos, 1991) y un Vertisol similar a la serie Febre (Plan Mapa de Suelos INTA- Gobierno de Entre Ríos, 1991), encontraron que el N_0 disminuyó con la profundidad, probablemente debido a una mayor cantidad de compuestos orgánicos nitrogenados en su superficie lo que concuerda con los tenores de C orgánico y N total, en tanto que la intensidad de mineralización tendió a elevarse en profundidad. Estos autores encontraron alto grado de asociación entre N_0 y C orgánico r = 0.983 en el suelo Molisol y r = 0.972 en el suelo Vertisol.

Stanford y Smith (1972), para una amplia gama de suelos de USA, encontraron una tasa de mineralización de 0,054 +/- 0,009, en tanto que **Oyanadel y Rodríguez** (1977) encontraron una tasa de mineralización promedio de 0.0058 +/- 0,01 en suelos de Chile, trabajando con muestras de horizontes superficiales, y **Hadas** *et al.* (1986) informaron que el N_0 disminuía en profundidad y que había relación consistente entre la profundidad y la tasa de mineralización.

Echeverría *et al.* (1994), trabajando en suelos del sudeste de la Provincia de Buenos Aires, encontraron que el N_0 de horizontes subsuperficiales fue inferior a las de horizontes superficiales, y la constante de mineralización (k) en los horizontes subsuperficiales presentaba valores mas elevados, lo que sugeriría una composición diferente dentro de la fracción susceptible de ser mineralizada en los diferentes horizontes. Otra posible explicación a las diferencias de k entre horizontes la constituyen las condiciones de incubación de las muestras de suelo que alteran las condiciones de degradabilidad de los compuestos nitrogenados.

En cuanto al aporte de los horizontes subsuperficiales, se considera que la sobreestimación por las condiciones de incubación de las muestras es más importante aún que la que se produce en los horizontes superficiales, y que se debe, principalmente, al manipuleo (secado, molido y tamizado) y mezclado con proporciones de arena que resultan en condiciones óptimas de aireación y humedad, que no ocurren en condiciones de campo.

Benintende *et al.* (2003) realizaron un análisis sobre muestras prove-

nientes de un perfil de suelo Argiduol Vértico similar al de la serie La Jaula (Plan Mapa de Suelos INTA- Gobierno de Entre Ríos, 1991) y determinaron el N mineralizado acumulado durante el tiempo de incubación de 183 días. Los resultados encontrados junto a las principales características de cada horizonte se presentan en la **Tabla 3**. El N_0 representó en este caso el 6,6% del N total en el horizonte superficial; la misma proporción fue encontrada por **Borgetto** *et al.* (1994) para la serie Febre en la Provincia de Entre Ríos.

Tabla 3: Materia orgánica (MO); nitrógeno total (Nt); N potencialmente mineralizable (N0) y constante de mineralización (k) en cada horizonte del perfil. Serie La Jaula

Horizontes	Espesor (cm)	Arcilla(%)	MO (%)	N tot. (%)	N_0 (mg.kg-1)	k
A1	17	27.9	2.99	0.158	104	0.0284
B21t	22	42.3	1.48	0.078	54	0.18141
B22t	43	45.2	0.86	0.062	40	0.5276
B3ca	38	37	0.45	0.043	22	1.7291

El valor de la proporción de N_0/N total del horizonte superficial fue similar a los citados por **Oyanadel y Rodríguez** (1977), cuyo rango para una amplia gama de suelos Vertisoles y Molisoles varió entre 4 y 12,6% del N total. También fue parecido a los valores citados por **Stanford y Smith** (1972) para un gran número de diferentes suelos en USA, que variaron entre 4,6 y 40,6% de N total, y a los señalados por **Prado y Rodríguez** (1978) que encontraron valores del N_0 que representaban entre 6,4 y 20,8% de N total.

La tasa de mineralización del N en el horizonte superficial fue marcadamente inferior a las citadas por otros autores, pero aumentó en profundidad. **Cassman y Muns** (1980), y **Hadas** *et al.* (1986) encontraron valores de k diferentes para diferentes horizontes.

En forma similar a los resultados encontrados por **Borgetto** *et al.* (1994) en el suelo Molisol, el N mineralizado acumulado disminuyó con la profundidad del suelo, hallándose una marcada diferencia entre el horizonte

superficial y el resto del perfil.

La importancia relativa del aporte de N por mineralización en las capas subsuperficiales del perfil, puede ser de mayor magnitud cuando la humedad del horizonte superficial es limitante y no lo es en los horizontes subsuperficiales (**Cabrera** *et al*. 1994). Esta relación es relativamente frecuente en los suelos de Entre Ríos en los que los horizontes subsuperficiales densos permanecen húmedos por períodos relativamente prolongados. **Hadas** *et al*. (1986) estimaron que la contribución relativa de los 20 cm. superficiales a la mineralización de los primeros 60 cm. varió entre 45 y 74%. **Cabrera** (1986), citado en **Cabrera** *et al.* (1994), estimó que los 15 cm. superficiales contribuirían con 45 a 56% de N mineralizable en 120 cm. de perfil y con el 90% de los primeros 45 cm. **Cassman y Muns** (1980), en incubaciones de 13 semanas, encontraron que el N mineralizado en los 18 cm. superficiales constituyó el 42% del N mineralizado hasta 108 cm. de profundidad.

Con el fin de ajustar el aporte de horizontes subsuperficiales, **Cian** *et al.* (2000), en el marco del proyecto que aquí se expone, plantearon un trabajo que tuvo como objetivo ajustar las cantidades de N aportado por los horizontes subsuperficiales mediante diversos índices. Se trabajó sobre un suelo Argiduol ácuico a profundidades de 0-20, 20-40, 40-60 cm. En la **Tabla 4** se presenta el N mineralizado, expresado en kg N ha^{-1}, durante un período coincidente con el desarrollo de cultivo de maíz, ajustado por factores de temperatura y humedad en las tres profundidades en suelo con y sin laboreo. Los primeros 20 cm contribuyeron con el 57% del N que se mineraliza en toda la profundidad estudiada.

Tabla 4: N mineralizado acumulado ajustado por temperatura y humedad en suelo sin (SL) y con laboreo (CL) (en el ciclo del cultivo de maíz)

Tratamiento	0-20 cm. (Kg. N ha^{-1})	20-40 cm. (Kg. N ha^{-1})	40-60 cm. (Kg. N ha^{-1})	0-60 cm. (Kg. N ha^{-1})
SL	142,1	82,2	23,5	247,8
CL	164,1	95,0	27,2	286,2

La contribución tan importante de los estratos subsuperficiales, espe-

cialmente el de 20-40 cm, que representó el 58 % del aporte del de 0-20 cm, parece exagerada teniendo en cuenta lo señalado por otros autores, por lo que se propuso considerar algún factor que corrigiera el N mineralizado en los horizontes subsuperficiales. Cómo índices para la corrección de los aportes de los horizontes subsuperficiales se determinaron: Carbono de la Biomasa Microbiana (CBM), amonificadores (Amon.) y actividad ureasa (AU). La proporción de CBM de las capas más profundas con respecto a la capa superficial representó el 49% para 20-40 cm y el 22% para 40-60 cm. La proporción de amonificantes fue propuesta como índice ya que, en el proceso de mineralización del N, la primera etapa es llevada a cabo por estos organismos, y además éste es el paso que regula la velocidad final del proceso. La proporción de amonificantes en las profundidades de 20-40 cm y 40-60 cm representó el 26% y 17% del horizonte superficial, respectivamente.

La determinación del número de amonificadores es una técnica poco simple y en la que se utiliza gran cantidad de material. Se trabajó también con una técnica más sencilla para medir actividad de la enzima ureasa, que podría reflejar las diferencias en actividad de mineralización en los diferentes estratos. La determinación en el perfil mostró una estratificación de la actividad de la enzima, donde las profundidades de 20-40 cm y 40-60 cm representaron el 46% y 35% del horizonte superficial, respectivamente.

En la **Tabla 5** se comparan los resultados obtenidos cuando se aplican los factores evaluados como índices de corrección del N mineralizado en las tres profundidades, durante el ciclo de cultivo en suelos con y sin labranza. Se puede observar que el N mineralizado, corregido por la proporción de amonificadores, estimó un aporte del 43% en los estratos subsuperficiales. En cambio la estimación realizada mediante la aplicación de los índices derivados del CBM y la AU indica que esta proporción asciende al 71 % con el CBM y al 80% con la AU.

Tabla 5: N mineralizado acumulado ajustado por temperatura y humedad y por otros índices en suelos sin (SL) y con laboreo (CL)

Profundidades) (cm)	SL				CL			
	N min. aj. (kg./ha)	CBM (kg./ha)	Amon. (kg./ha)	AU (kg./ha)	N min. aj. (kg./ha)	CBM (kg./ha)	Amon. (kg./ha)	AU (kg./ha)
0-20	142,1	142,1	142,1	142,1	164,1	164,1	164,1	164,1
20-40	82,2	69,6	36,9	65,4	98,0	80,4	42,7	75,5
40-60	23,5	31,3	24,2	49,7	27,2	36,1	27,9	57,4
0-60	247,8	242,9	203,2	257,2	289.3	280.6	234,7	297,0

N min. aj.: N mineralizado acumulado ajustado por temperatura y humedad
CBM: N mineralizado acumulado ajustado por índice de biomasa microbiana
Amon.: N mineralizado acumulado ajustado por índice de amonificadores
AU: N mineralizado acumulado ajustado por índice de actividad ureasa

Benintende y Benintende (2001), mediante la aplicación de un balance en un cultivo de maíz, dedujeron que la proporción de amonificadores fue la que permitía estimar mejor el N mineralizado en relación con el consumo del cultivo. A partir de estos resultados se podría concluir que el aporte por mineralización de las capas subsuperficiales contribuye significativamente al N mineralizado en el suelo y que deberían ser consideradas en su estimación, aunque las mediciones directas en las capas subsuperficiales sobreestimarían este aporte.

Para evaluar el efecto del laboreo sobre las estimaciones de N mineralizado ajustado, se planteó un ensayo sobre un suelo Argiudol ácuico en el que se aplicaron dos tratamientos: uno con labranza (CL) y el otro sin aplicación de labores (SL). Se muestreó cada tratamiento por triplicado a tres profundidades: 0-20, 20-40 y 40-60 cm en las siguientes fechas: 28/9, 22/10, 14/11, 7/12, 21/12 y 16/1, coincidentes con estadíos fenológicos del cultivo de maíz. Se registraron la temperatura y humedad del suelo y las precipitaciones. Para los ajustes del N_0 se utilizaron valores de temperatura de suelo medidas en la EEA Paraná del INTA, corregidos por mediciones "in situ". En la situación CL, la temperatura durante el ciclo fue 2ºC superior que SL. En las seis fechas de muestreo se determinó el N mineral en las 3 profundidades. En la **Tabla 6** se presentan valores medios de N Total, N mineralizado acumulado, N_0 y N mineralizado ajustado en condiciones de laboreo y sin labranza. El N_0 comprende una frac-

ción del N total que para esta situación fue del 12,5; 9,4 y 3,2 % en las profundidades del 0-20, 20-40 y 40-60 cm. Para el tratamiento SL, la mineralización ajustada fue de 248 kg de N ha^{-1} en la profundidad de 0-60 cm, mientras que para el tratamiento CL fue de 286 kg de N ha^{-1}. La diferencia se debió fundamentalmente al aporte del horizonte superficial. Al analizar los factores que influyeron sobre la mineralización en los dos tratamientos, se consideró que en el tratamiento SL presentó una temperatura inferior en dos grados en todas las mediciones realizadas, mientras que el contenido de humedad fue cercano al óptimo en los dos casos. La diferencia en la cantidad de N mineralizado estuvo dada por el primer factor que lo afecta en forma exponencial, mientras que la humedad lo hace en forma lineal.

Tabla 6: N Total, N mineralizado acumulado, N potencialmente mineralizable (N0) y N mineralizado ajustado en suelo con (CL) y sin laboreo (SL)

Profundidad	N total (%)	N min. acumulado	N0(mg Kg.-1) (mg Kg.-1)	N min. Ajustado (Kg. N ha -1)	
				SL	CL
0-20 cm	0,155a	147 a	182,7 a	142,1	164,1
20-40 cm	0,100b	70 b	94,7 ab	82,2	95,0
40-60 cm	0,085c	45,9 c	83,3 b	23,5	27,2

Nota: Valores seguidos de igual letra no presentan diferencias significativas LSD (α=0.05)

Del seguimiento del N mineral en las profundidades evaluadas en los sucesivos muestreos se observó que el mayor aporte se produjo en los primeros 20 cm y la presencia de N mineral en las capas subsuperficiales probablemente se debió a la lixiviación, ya que los mayores contenidos en las capas más profundas se presentaron a continuación de la ocurrencia de precipitaciones en el área. Las mediciones de N mineral en los distintos estratos reafirma la idea planteada precedentemente sobre el aporte de los estratos subsuperficiales por el proceso de mineralización

III. Estimaciones de aporte de N del suelo utilizando N_0

Con el fin de contrastar los aportes de N estimados mediante las

incubaciones aeróbicas a largo plazo con la absorción por parte del cultivo se plantearon ensayos sobre cultivos de trigo y maíz, que se presentan a continuación. El objetivo de estos ensayos fue el de estimar los aportes de N del suelo a través del proceso de mineralización durante el ciclo de crecimiento del cultivo, para lo cual se determinó el N_0 en muestras de suelo y se ajustaron los valores de N estimado en laboratorio, por temperatura y humedad a campo. La determinación del N mineralizable en las muestras de suelo se hizo mediante incubaciones aeróbicas a largo plazo, tal como fuera planteado anteriormente.

Se utilizaron valores de temperatura del suelo durante el período de desarrollo del cultivo, tomadas de los boletines mensuales de la Estación Meteorológica de la EEA Paraná-INTA. En el cálculo del balance hídrico se utilizó la humedad inicial del suelo y se consideraron las precipitaciones de registros cercanos al área del ensayo y el gasto producido por evapotranspiración. La relación entre la humedad total y la óptima para la mineralización, expresadas como altura en milímetros, fue utilizada para el cálculo del N mineralizado ajustado por humedad del suelo.

III.1. Estimación del aporte de nitrógeno del suelo al cultivo de trigo

El suelo sobre el cual se llevó a cabo el ensayo es un Peluderte argiudólico. Antes de la siembra de trigo se tomaron tres muestras compuestas de suelo a las profundidades de 0- 15 cm y 15 – 30 cm. En estas muestras el contenido de C orgánico fue de 2.09 y 1.64 %; el N total de 0.175 y 0.144 y el N_0 de 151 y 132 mg kg^{-1} de suelo. Hasta el momento de madurez fisiológica el N mineral acumulado fue de 102,32 kg N ha^{-1} en los 30 cm. Estudiados.

Se realizó otro ensayo en este cultivo sobre un suelo Argiudol vértico. Se utilizó un diseño en bloques completos al azar, con tres repeticiones. Para este trabajo se utilizaron los tratamientos testigo T0 y T138 al que se le aplicó 138 kg de N ha^{-1} en forma de urea en la siembra. Se realizaron muestreos de suelo hasta el metro de profundidad antes de la siembra y durante el ciclo del cultivo en los estadios fenológicos macollaje (3/7), antesis (14/8), en madurez fisiológica (13/10) y en el momento de cosecha (17/11). Se obtuvieron muestras compuestas por tres submuestras cada una, en cinco profundidades: 0-20cm.(horizonte Ap), de 20 a 40 cm.

(horizonte B1t), de 40 a 80 cm. (horizonte B2t) y de 80 a 100 cm. (horizonte BC), en cada parcela de los dos tratamientos evaluados. Se estimó la tasa de absorción diaria de N por el cultivo en base a la diferencia en N acumulado en el material vegetal entre dos muestreos y el número de días del período considerado.

A partir de las cantidades de N mineralizado estimado semanalmente por el modelo de ajuste por temperatura y humedad del suelo, se estimó la tasa de mineralización en condiciones de campo por día para su comparación con las tasas de absorción de N por el cultivo.

El N_0 estimado fue de 104 mg kg^{-1}. El N_0 ajustado de acuerdo a las condiciones de temperatura y humedad del suelo durante el ciclo del cultivo, considerado el aporte de los horizontes subsuperficiales, permitió estimar una mineralización de 101 kg de N ha^{-1}. Los valores más altos de N mineralizado durante el ciclo se encontraron en los períodos de mayor temperatura y humedad del suelo. Durante la vigésima primera semana del ciclo se registró la máxima mineralización debido fundamentalmente a mejores condiciones de humedad para la misma y mayores temperaturas registradas. En ese momento, el cultivo alcanzó la madurez fisiológica y el ritmo de absorción de N fue prácticamente nulo, por lo tanto, a partir de dicho momento el N mineralizado no fue aprovechado. Esto puede visualizarse en la cantidad de N mineral presente en el perfil al finalizar el ciclo del cultivo. Los nitratos encontrados en el estrato 0-20 cm representaron aproximadamente el 50% del total encontrado hasta el metro de profundidad. Durante la mayor parte del ciclo, el contenido de nitratos más alto se encontró en el estrato superficial (0-20 cm).

Las precipitaciones durante el barbecho fueron inferiores al promedio histórico para la zona y las producidas durante el ciclo del cultivo se distribuyeron de tal forma que el mismo sufrió un déficit hídrico durante la floración, que afectó el rendimiento. Esto probablemente provocó la falta de diferencias entre los tratamientos evaluados, tanto en materia seca acumulada, que fue de 5715 y 6438 kg ha^{-1} para el testigo y fertilizado respectivamente, como para el rendimiento, que fue de 1657 y 2060 kg ha^{-1}, respectivamente. La cantidad de N absorbido por el cultivo fue de 52 y 61 kg N ha^{-1}, para el tratamiento sin fertilizar y fertilizado, respectivamente. El índice de cosecha de N fue del 65,7 y 69,5 % para el cultivo sin

fertilizar y fertilizado, respectivamente, en tanto que la cantidad de N absorbida por el cultivo por tonelada de grano producido fue de 31,3 y 29,6 kg N tn^{-1} grano para el cultivo sin fertilizar y fertilizado, respectivamente.

Las tasas de mineralización aumentaron a lo largo del ciclo del cultivo de 0,78 a 1,21 kg N ha^{-1} $día^{-1}$ como consecuencia, fundamentalmente, del aumento de temperatura. La tasa de absorción de N en el primer período analizado fue de 0,55 kg N ha^{-1} $día^{-1}$ para el cultivo sin fertilizar y fue la máxima encontrada. **Díaz Zorita y Duarte** (2000) citan que, inicialmente, la demanda diaria de N es de aproximadamente 0,5 kg N ha^{-1} $día^{-1}$. Esta demanda se intensifica hasta la aparición de la espiga (**López Bellido**, 1991). Según **Díaz Zorita y Duarte** (2000), el cultivo de trigo en condiciones normales de desarrollo llega a absorber hasta 3 – 3,5 kg N ha^{-1} $día.^{-1}$. **Melchiori y Paparotti** (1996) encontraron una tasa máxima de absorción de 4,8 kg N ha^{-1} $día.^{-1}$. Como puede observarse, estos valores son muy superiores al encontrado en este trabajo, confirmando la existencia de algún factor limitante que impidió el normal desarrollo del mismo, como el estrés hídrico sufrido.

Las tasas de absorción de N por parte del cultivo para los diferentes períodos evaluados fueron muy bajas y ampliamente cubiertas por el N mineralizado a partir del suelo.

Al realizar un balance entre la oferta de N y el consumo por el cultivo, se encontró una disponibilidad inicial de 86 kg N ha^{-1}. El aporte estimado por mineralización durante el ciclo fue de 101 kg N $ha^{-1,}$ lo que totaliza 187 kg N ha^{-1}. El consumo del cultivo fue de 52 kg N ha^{-1} y los nitratos presentes al final del período del cultivo fueron de 109 kg N ha^{-1}. La diferencia entre la oferta de N y el consumo por el cultivo más el N residual, fue de 26 kg N $ha^{-1,}$ que pueden atribuirse a pérdidas diversas que en nuestro trabajo no fueron evaluadas. Lo expuesto nos lleva a suponer que el estrés hídrico sufrido por el cultivo impidió un mayor aprovechamiento del N disponible, de allí la falta de diferencias entre los tratamientos evaluados.

III.2. Estimación del aporte de nitrógeno del suelo en un cultivo de maíz

Este ensayo se instaló en un suelo Argiudol ácuico. Se realizaron

muestreos de suelo y material vegetal durante el ciclo del cultivo. Antes de la siembra se tomaron tres muestras compuestas de suelo a las profundidades de 0- 20 cm, 20 – 40 cm, y 40 –60 cm. En la **Tabla 7** se presentan los valores promedios de las variables edáficas en el muestreo inicial del suelo.

El aporte de N por mineralización del estrato de 20 a 40 cm. representó el 56,1% del estrato superficial, el estrato de 40 a 60 cm. representó el 36,2% del mismo al finalizar el período de incubaciones. Los valores de N mineralizado, ajustados por temperatura y humedad en las profundidades evaluadas, fueron de 55, 27 y 8 mg kg^{-1} respectivamente lo que representó un total de 245 kg de N/ha en el período de crecimiento del cultivo de maíz.

El rendimiento del cultivo fue de 8500 kg ha^{-1} y el consumo de nitrógeno por el cultivo fue de 180 kg de N ha^{-1}.

Tabla 7: Valores promedios de C orgánico, N total, y N potencialmente mineralizable (N0) en las profundidades estudiadas. Muestreo en cultivo de maíz

	Prof. 0-20 cm.	Prof. 20-40 cm.	Prof. 40-60 cm.
C orgánico (%)	1,79	1,15	0,55
N total (%)	0,155	0,100	0,085
N0 (mg Kg-1)	182,74	94,71	27,07

IV. Técnicas rápidas para estimación del N_0. Generación de los primeros modelos

La estimación del N_0 mediante las incubaciones aeróbicas presenta inconvenientes en relación con los largos períodos que se requieren, lo que hace que la misma no pueda utilizarse como técnica de rutina en laboratorio de diagnóstico de fertilidad nitrogenada. Numerosos métodos han sido desarrollados para obtener índices con los cuales se pueda predecir el suministro de N del suelo al cultivo, y que correlacionen con el N_0. Deben consistir en técnicas de laboratorio simples, rápidas y reproducibles.

Uno de los índices que tiene mayor difusión es el que se basa en la digestión con ClK 2M a 100ºC por 4 hs. Otro índice son las incubaciones anaeróbicas de 7 días (**Waring y Bremmer**, 1964). A partir de los trabajos realizados en nuestra investigación, **Sterren** *et al.* (2001) presentaron las relaciones encontradas entre las técnicas rápidas de Incubaciones Anaeróbicas de 7 días y la determinación de N extraíble con ClK 2 M, con el N_0 en suelos Molisoles y Vertisoles de la Provincia de Entre Ríos. Al analizar todos los suelos en conjunto, disminuyó notablemente el grado de asociación entre las variables, lo que probablemente sea atribuible a la gama de suelos que resulta de la intergradación entre los dos órdenes, suelos que presentan perfiles con epipedón mólico pero con importantes diferencias entre sí. Por otra parte, la mayoría de los Molisoles de esta provincia tienen una prolongada historia de utilización agrícola, lo que, sumado al paisaje en que se encuentran ubicados y a las características climáticas del área, hace que actualmente presenten una considerable erosión hídrica. No ocurre lo mismo con los Vertisoles, que en la provincia han sido utilizados para ganadería hasta hace algunos años, y además se encuentran ubicados en un paisaje de menores pendientes que los Molisoles.

Gianello y Bremner (1986) y **Echeverría** *et al* (2000) encontraron mayor correlación trabajando con suelos que presentaban menor variabilidad de manejos que en el presente estudio, en el que se incluyeron suelos a los que se aplicaban diferentes sistemas de labranza, sin laboreo.

Al analizar por separado los Vertisoles, las incubaciones anaeróbicas presentaron una correlación algo menor que en el KCl 2M, pero ambos fueron significativos.

Los modelos lineales que permitirían estimar el N_0 a partir de las técnicas evaluadas fueron:

Para todos los suelos en su conjunto:

$\mathbf{N_0 = 1.4812\ N\text{-}KCl + 173.75}$ (R^2= 0,285)

$\mathbf{N_0 = 0.6432\ N\text{-}IA + 113.06}$ (R^2= 0,237)

Para suelos Peludertes:

$\mathbf{N_0 = 2.7673\ N\text{-}KCl + 108.1}$ (R^2= 0,740)

$\mathbf{N_0 = 1.3048\ N\text{-}IA + 31.235}$ (R^2= 0,654)

Para suelos Argiudoles:

$\mathbf{N_0 = 1.102\ N\text{-}KCl + 191.08}$ (R^2= 0,2014)

V. Pruebas con ensayos a campo

A partir de la obtención de estos modelos se hicieron nuevos ensayos a campo para probar la utilidad de estas herramientas para la estimación de dosis de fertilización nitrogenada. En los mismos se determinó el N mineral presente en el perfil en el momento de la siembra y el N extractable con KCl 2M. Se transformaron los valores en N_0 y se corrió el modelo de corrección por temperatura y humedad para estimar el N mineralizable durante el ciclo del cultivo. Además, para la utilización del N-ClK con fines diagnóstico, se utilizaron registros históricos de temperaturas del suelo (1934-1999), para el período considerado y se aplicó el modelo para dos situaciones probables de humedad (para año seco, contenido relativo de humedad (respecto del óptimo para mineralización) de 0,5 y para año normal de 0,8.

V.1. Ensayo en cultivo de trigo

El primer ensayo se ubicó en un lote de productor en el Distrito Isletas, Departamento Diamante, a unos 65 Km. al SE de la ciudad de Paraná, sobre un suelo Argiudol vértico. El N inicial presente en el perfil fue de 14,88 mg de $N\text{-}NO^-_3$ kg^{-1} de suelo en los primeros 20 cm. y de 6,75 mg de $N\text{-}NO^-_3$ kg^{-1} en el resto del perfil. Esto representó un total de 106,54 kg de N ha^{-1}. Al final de ciclo del cultivo el N mineral presente representó unos 63 kg de N/ha El N extractable mediante la técnica de KCl 2M fue de 9,34 mg kg^{-1} para los 20 cm. superficiales. El N_0 estimado con el modelo fue de 201 mg kg^{-1}. Al realizar los cálculos correspondientes para corregir este valor por temperatura y humedad a campo para un año con probables déficit hídrico, en el que la humedad relativa al óptimo para el proceso de mineralización fuese de 0,5, encontramos que se podrían mineralizar unos 96,86 kg de N ha^{-1}.

Si la disponibilidad de N a la siembra fue de 106,5 kg N ha^{-1}, la disponibilidad de N durante el ciclo para el cultivo de trigo rondaría los 203 kg de N ha^{-1}. Si se considera una eficiencia de absorción de N promedio de 50%, se podría obtener un rendimiento de casi 3400 kg ha^{-1}, considerando que por cada tonelada de trigo producida el cultivo de trigo con-

sume 30 kg de N ha^{-1} (**Darwich**, 1998). Para un año más húmedo, en el cual el promedio de humedad del suelo fuera cercano al 80% del óptimo para el proceso de mineralización, se podrían mineralizar unos 174 kg de N ha^{-1}. Con los mismos elementos e información que en el caso anterior, se puede estimar que el cultivo dispondría de 140 kg de N, que permitiría obtener un rendimiento de 4680 kg $ha^{-1.}$

Para la realización de este trabajo se contó con el tiempo suficiente para estimar el contenido de humedad de suelo durante todo el ciclo y aplicar el modelo de **Oyanedel y Rodríguez** (1977) para obtener las cantidades de N mineral corregido. El contenido de humedad del suelo se encontró muy cerca del óptimo para el proceso de mineralización durante casi todo el ciclo. El contenido relativo de humedad osciló entre un mínimo de 0,71 al inicio y un máximo de 1,00 al final del ciclo del cultivo. Con estos valores y los de temperatura del suelo, se obtuvo otra estimación del N mineralizado durante el ciclo del cultivo.

La cantidad de N mineralizado por semana aumenta a medida que lo hace la temperatura y el contenido de humedad del suelo. Se encontró un máximo de 4,52 mg de N-NO^-_3 kg^{-1} en los 20 cm superficiales en la última semana del cultivo. Cabe mencionar que, en esta semana, el cultivo llegó a madurez fisiológica, por lo cual este N no es absorbido en su totalidad por el mismo, lo que explica el valor de N mineral residual encontrado.

Los aportes del suelo por mineralización de N durante el ciclo del cultivo de trigo, expresados en kg N ha^{-1}, fueron de 142,6; 34,08 y 22,28 , para las profundidades de 0 a 20, 20 a 40 y 40 a 60 cm respectivamente. Lo que totalizó 198,96 kg de N ha^{-1} para lo primeros 60 cm del perfil. La biomasa aérea fue de 12408 kg ha^{-1} y el rendimiento de 4290,6 kg ha^{-1}.

Como se puede observar, el rendimiento del cultivo fue alto para la zona, pero cabe mencionar que fue un año de buenas condiciones climáticas, en cuanto a que las precipitaciones y las temperaturas fueron normales para el período evaluado. La absorción de N del cultivo fue de 124,73 kg N ha^{-1}. El porcentaje de N en grano fue de 1,96 % y en resto de planta fue de 0,5 %. El índice de cosecha de N (ICN) fue del 67,5 %. La cantidad de N absorbida por el cultivo por tonelada de grano producida fue de 29,1 kg N Tn^{-1} grano.

El cultivo absorbió, hasta madurez fisiológica, un total de 124,73 kg N ha^{-1}, sobre una disponibilidad de 305,51 kg N $ha^{-1.}$

V.2. Ensayos en cultivo de maíz

Se realizaron muestreos en las dos situaciones, con aplicación de fertilizante y testigo.

En el primer ensayo, la dosis indicada fue de 54 kg de N ha^{-1}. Se realizó en un lote de un productor al norte del Departamento Paraná, cerca de la localidad de Hasenkamp, en un suelo Argiudol vértico. Los valores medios de las variables evaluadas en el maíz en las profundidades muestreadas se presentan en la **Tabla 8**.

Tabla 8: N disponible al inicio y fin del ciclo del cultivo de maíz

	Prof. 0-20 cm.	**Prof. 20-40 cm.**
N- NO- 3 iniciales mg kg^{-1}	10.6	5.43
N- NO- 3 finales mg kg^{-1} testigo	21.26	7.67
N- NO- 3 finales mg kg^{-1} fertilizado	27.25	16.40

Los nitratos iniciales representaron 42,2 kg N ha^{-1} en los primeros 40 cm. Los nitratos residuales en el testigo 76 kg N ha^{-1} y en el tratamiento fertilizado 115 kg N ha^{-1}. El promedio de N extractable con KCl 2M fue de 12 mg de N kg^{-1}. Utilizando el modelo propuesto para transformar los valores de N-KCl en $N_{0,}$ resultó en 204 mg de N kg^{-1} al corregir por humedad y temperatura a campo para el período considerado. Se encontró que, si se prevé un año seco ($\theta / \theta_0 = 0.5$), el aporte podría alcanzar 160 kg de N/ha durante el ciclo del cultivo en los primeros 40 cm del perfil, en tanto que si se considera un año húmedo ($\theta / \theta_0 = 0.8$), este aporte alcanzaría los 307 kg de N ha^{-1}. En la **Tabla 9** se presentan los datos medios de rendimiento, biomasa y concentración de N en la biomasa vegetal en las dos situaciones muestreadas.

Tabla 9: Biomasa aérea, rendimiento, concentración de N en la biomasa vegetal del cultivo de maíz e índice de cosecha de N (ICN)

	Maíz testigo	Maíz c/fertilizante N
Biomasa aérea total kg ha-1	14723	18829
Rendimiento en granos kg ha-1	6979	7732
N grano kg ha-1	110	134
N resto pl kg ha-1	25	38
N MS total kg ha-1	135	172
ICN (%)	81	78
Kg N Tn-1 grano	19.3	22.3

En un segundo ensayo realizado al norte del Departamento Paraná, cerca de la localidad de Hasenkamp, en un suelo Peludertes ártico, se aplicó la dosis de fertilización indicada por el técnico asesor (54 kg de N ha^{-1}). En la **Tabla 10** se presentan los valores medios de las variables evaluadas en el maíz en las profundidades muestreadas.

Los nitratos iniciales representaron 47 kg N ha^{-1} en los primeros 40 cm. Los nitratos residuales en el testigo 104.8 kg N ha^{-1} y en el tratamiento fertilizado 104.2 kg N ha^{-1}. El promedio de N extractable con KCl 2M fue de 13.5 mg de N kg^{-1}. Utilizando el modelo propuesto para transformar los valores de N-KCl en N_0 resultó en 145.5 mg de N kg^{-1} al corregir por humedad y temperatura a campo para el período considerado se encontró que si se prevé un año seco ($\theta / \theta_0 = 0.5$) el aporte podría alcanzar 111 kg de N ha^{-1} durante el ciclo del cultivo en los primeros 40 cm. del perfil. Si se considera año húmedo ($\theta / \theta_0 = 0.8$) este aporte alcanzaría los 223 kg de N ha^{-1}. En la **Tabla 11** se presentan los datos medios de rendimiento, biomasa y concentración de N en la biomasa vegetal en las dos situaciones muestreadas.

Tabla 10: N disponible al inicio y fin del ciclo del cultivo de maíz

	Prof. 0-20 cm	Prof. 20-40 cm
N- NO- 3 iniciales mg kg -1	11.65	6.75
N- NO- 3 finales mg kg -1 testigo	21.88	19.02
N- NO- 3 finales mg kg -1 fertilizado	22.01	18.8

Tabla 11: Biomasa aérea, rendimiento, concentración de N en la biomasa vegetal del cultivo de maíz e índice de cosecha de N (ICN)

	Maíz testigo	Maíz c/fertilizante N
Biomasa aérea total kg ha^{-1}	18380	19027
Rendimiento en granos kg ha^{-1}	5233	7286
N grano kg ha^{-1}	141	163
N resto planta kg ha^{-1}	47	39
N MS total kg ha^{-1}	187	202
ICN (%)	29	38
Kg N Tn^{-1} grano	26.9	22.4

Otro ensayo se realizó en un lote de un productor en Departamento Diamante, en un suelo Argiudol ácuico. La historia de cultivos del lote en el que se realizaron las determinaciones fue: Pradera 4 años, maíz (utilizando un sistema de labranza convencional), soja (con labranza convencional), trigo/soja (en siembra directa), maíz (en siembra directa) (1), soja (siembra directa), maíz (siembra directa) (2). El trabajo consistió en muestreos del lote en dos momentos: a la siembra del maíz (1) y a la siembra del maíz (2). Se tomaron muestras de suelo y de material vegetal en estos dos cultivos.

En el primer caso -Maíz (1)-, antes de la siembra se tomaron tres muestras compuestas de suelo a las profundidades de 0-20 cm, 20-40 cm, y 40-60 cm. Durante el ciclo del cultivo se realizaron muestreos de suelos (seis) y material vegetal (cinco) en diferentes momentos. Las precipitaciones registradas durante el ciclo fueron algo mayores que el promedio para el período de desarrollo del cultivo, registrándose 400 mm, con un solo período con déficit hídrico en el mes de noviembre. Se consideraron los valores de temperatura diaria del suelo a distintas profundidades, promedios para el período de desarrollo del cultivo, que fueron provistos por la Estación Meteorológica de la EEA Paraná de INTA. En la **Tabla 12** se presentan los valores medios de las variables evaluadas en el maíz (1) en las tres profundidades muestreadas. El N mineral acumulado en el período de incubaciones fue de 140,67 mg kg^{-1}, el N_0 de 182,7 mg kg^{-1}, y la tasa de mineralización de 0,0353, lo que indica que a 35 ºC la fracción de N_0 se libera a una tasa de 3,53% por semana. Al corregir estos valores por

temperatura y humedad a campo para el período considerado se encontró que el aporte del horizonte superficial fue de 150 kg N durante el ciclo del cultivo. En base a la estimación de aporte de los estratos subsuperficiales, se estima que el perfil aporta por mineralización unos 214 kg de N. El consumo de N del cultivo fue de 180 kg de N/ ha^{-1}. Utilizando el modelo propuesto para transformar los valores de N-KCl en $N_{0,}$ resultó en 204 mg kg^{-1}; al corregir por humedad y temperatura a campo para el período considerado, se encontró que el aporte del horizonte superficial fue de 167,5 kg N ha^{-1} durante el ciclo del cultivo. En base a la estimación de aporte de los estratos subsuperficiales, se estima que el perfil aporta por mineralización unos 235 kg de N ha^{-1}.

Tabla 12: N disponible al inicio y fin del ciclo del cultivo de maíz (1) en las profundidades evaluadas

	Prof. 0-20 cm	Prof.20-40 cm	Prof. 40-60 cm
N- NO 3 iniciales mg kg -1	8.72	7.1	5.4
N- NO 3 finales mg kg -1	0.1	0.1	0.0

En el segundo caso -Maíz (2)-, se tomaron muestras de suelo compuestas a las profundidades de 0-20, 20–60 y 60-100 cm, con dos repeticiones, en dos momentos: previo a la siembra del cultivo y en la etapa de madurez fisiológica del mismo, para determinación del N mineral presente en esta etapa. Se tomaron muestras del material vegetal en madurez fisiológica de parte aérea con dos repeticiones. El N mineral acumulado al momento de la siembra y al momento de cosecha se pueden observar en la **Tabla 13**. El N extractable por la técnica de KCl 2M transformado a N_0 resultó en 200 mg kg^{-1}. Este resultado se aplicó al modelo propuesto por **Oyanedel y Rodríguez** (1977) con temperaturas de suelo a 20 cm. de profundidad, que fueron de 16.7ºC al momento de la siembra y de 24ºC al momento de madurez fisiológica.

Tabla 13: N disponible al inicio y fin del ciclo del cultivo de maíz (2) en las profundidades evaluadas

	Prof. 0-20 cm	Prof.20-60 cm	Prof. 60-100 cm
N- NO 3 iniciales mg kg -1	16.22	9.17	5.77
N- NO 3 finales mg kg -1	15.53	9.81	14.77

Los resultados de las estimaciones para año húmedo y para año seco fueron:

N mineralizado para humedad del 80% de la óptima 226 kg de N ha^{-1}.

N mineralizado para humedad del 50% de la óptima 126 kg de N ha^{-1}

Dado que los cálculos se realizaron con posterioridad al momento de cosecha, puede decirse que el primer valor es el más adecuado, ya que el año se presentó relativamente húmedo durante todo el ciclo del cultivo de maíz, si bien no se repitieron las excelentes condiciones para el desarrollo del mismo que se presentaron en el Maíz (1). El consumo de N por el cultivo fue de 110 kg ha^{-1}; la diferencia con el primer caso podría atribuirse a diferencias en las condiciones de humedad.

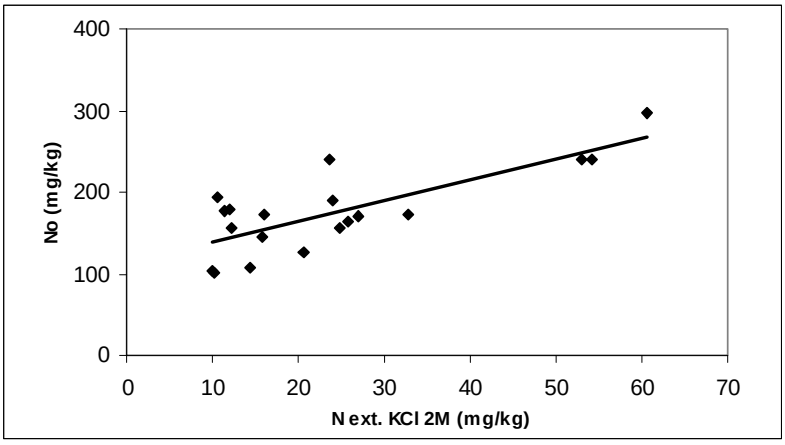
Pese a las simplificaciones en muestreos, toma de datos de suelo y cultivo, etc., al aplicar la técnica de KCl 2M en el segundo maíz en siembra directa, se obtuvieron resultados similares, por lo que en principio puede concluirse que la técnica de KCl 2 M en base a la comparación con los resultados de las incubaciones aeróbicas a largo plazo podría ser utilizada con razonable certeza como diagnóstico de fertilidad nitrogenada, si se la asocia a un correcto pronóstico de probabilidades de lluvia y, en consecuencia, a niveles de humedad edáfica, al menos para situaciones particulares como la que se presenta.

Como se desprende del análisis de los resultados hasta aquí expuestos, en algunos casos la técnica de KCl 2M resultó promisoria y se obtenía un buen ajuste con los datos de N_0 de incubaciones a largo plazo. No ocurría lo propio en otros casos, por lo que surgió la necesidad de ajustar nuevos modelos con mayor número de datos, tanto de incubaciones aeróbicas a largo plazo como de ensayos a campo.

VI. Ajuste de nuevos modelos con mayor cantidad de datos de campo y laboratorio

Con el objetivo de mejorar los ajustes de las ecuaciones encontradas, se seleccionaron suelos de uso agrícola en los que se incluyeron algunos con diferentes niveles de degradación. Los suelos del área evaluada corresponden al orden Molisol (Argiudoles) al oeste y Vertisol (Peludertes) al este, con una amplia zona intermedia en la cual se mezclan los dos órdenes, dando lugar a una intergradación. Para este trabajo se seleccionaron muestras de suelo provenientes de lotes en uso agrícola, con una variada historia cultural y sistemas de manejo, tomadas en un lapso de tres años. Los contenidos de carbono orgánico fluctuaron entre 17,9 y 25,0 g de C kg^{-1} suelo y los de N total entre 1,54 y 2,15 g de N kg $^{-1}$ suelo. Se efectuó un test de correlación entre las variables: N_0 y N-ClK se disponía de 19 pares de datos, el r de referencia fue de 0,456 (p=0.05) y de 0,575 (p=0.01). Para la estimación del N_0 se ajustó un modelo lineal. En la **Figura 2** se presenta la relación obtenida.

Figura 2: Relación entre N0 y N extractable con KCl 2M



Los valores de N_0 fluctuaron entre 104 y 220 mg.kg^{-1} de suelo y los de KCl 2M entre 11,5 y 55 mg kg^{-1} de suelo. Los valores más altos en ambos casos corresponden a lotes en siembra directa, en suelos vertisoles, y los más bajos, a lotes con larga historia agrícola. El modelo lineal ajustado fue **N_0 = 2,545 N-ClK + 113,7** (R^2= 0,6053) (**Benintende** *et al.*, 2003)

Los N_0 estimados mediante la aplicación del modelo presentan un rango absoluto 34% menor que los obtenidos por incubaciones aeróbicas a largo plazo, lo que le da menor sensibilidad.

Por otra parte, aun cuando en los primeros modelos generados durante esta investigación, las incubaciones anaeróbicas de muestras de suelo durante 7 días presentaban menor ajuste que el KCl 2M con el N_0, trabajos realizados por **Echeverría** *et al* (2000) y **Calviño y Echeverría** (2003) encontraron que esta técnica podría ser un buen predictor de la capacidad de mineralización de N del suelo. Entre las ventajas de la utilización dela misma, en la primera obra mencionada se destaca la mínima influencia del pretratamiento de las muestras sobre los resultados, la ausencia de problemas relacionados con el ajuste a condiciones óptimas de humedad durante la incubación y el bajo requerimiento de aparatos y reactivos. Por esta razón, se volvieron a trabajar los datos con un mayor número de muestras, tal como con el KCl 2M.

Se realizó un trabajo con el objetivo de establecer el grado de asociación entre el N_0 obtenido mediante incubaciones aeróbicas a largo plazo y el N estimado mediante incubaciones anaeróbicas de 7 días **Waring y Bremmer** (1964), en algunos suelos de uso agrícola de la provincia de Entre Ríos. Además se realizó una comprobación del modelo generado sobre otro grupo de datos, con el fin de establecer la posibilidad de utilizar la técnica de incubaciones anaeróbicas de 7 días (N-IA) como estimador del potencial de mineralización en suelos. Se emplearon muestras de suelos Molisol (Argiudoles), Vertisol (Peludertes) y Argiudoles vérticos. Se seleccionaron los datos de muestras de suelo provenientes de lotes en uso agrícola, con una variada historia cultural y sistemas de manejo, tomadas en un lapso de tres años. Se emplearon horizontes superficiales. En cada situación se tomaron tres muestras compuestas de más de veinte submuestras, las que fueron acondicionadas mediante secado al aire y tamizado por 2 mm y por 0,5 mm. Los contenidos de materia orgánica y

de N total de los horizontes superficiales de los sitios estudiados se presentan en la **Tabla 14**. Se efectuó un test de correlación entre las variables: N_0 y N- IA sobre 33 pares de datos, el r de referencia fue de 0,349 ($p=0.05$) y de 0,449 ($p=0.01$). Para la estimación del N_0 se ajustó un modelo lineal. Los valores de N_0 obtenidos a partir de incubaciones aeróbicas a largo plazo fluctuaron entre 88 y 231 mg de N /kg de suelo y los de N-IA entre18,9 y 136,6 mg de N /kg de suelo. Los valores más altos en ambos casos corresponden a lotes en siembra directa en suelos Vertisoles, y los más bajos a lotes con suelos Argiudoles vérticos con larga historia agrícola y con síntomas de degradación por erosión, lo que pone de manifiesto que los resultados de ambos métodos reflejan la historia cultural de los suelos estudiados.

Tabla 14: Características de los suelos analizados.

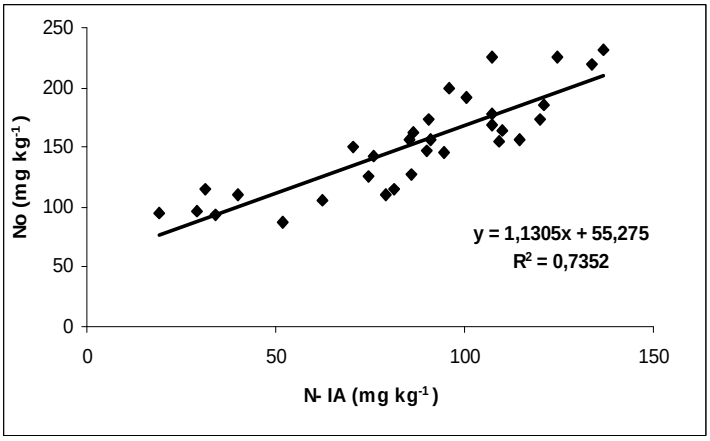
Suelo	Manejo	Materia Orgánica g kg -1	Nitrogeno total g kg -1
Vertisol	Uso agrícola. Labranza Convencional	44,8	1,64
Vertisol	Uso agrícola Siembra Directa	40,5	2,00
Argiudol vértico	Uso agrícola Trigo Siembra Directa	32,2	1,70
Vertisol	Uso agrícola Trigo	32,3	1,77
Molisol	Uso agrícola Lino Labranza Convencional	36,4	nd
Molisol	Uso agrícola Maíz Siembra Directa	30,8	1,54
Argiudol vértico	Uso agrícola Trigo Siembra Directa	32,5	1,64
Vertisol	Uso agrícola trigo	35,3	1,72
Argiudol vértico	Uso agrícola maíz	22,4	1,24
Argiudol vértico	Uso agrícola maíz	37,5	1,73
Vertisol	Uso agrícola maíz	35,9	1,86
Argiudol vértico	Suelo degradado	17,4	0,84
Argiudol vértico	Suelo degradado	24,7	1,03

Para la totalidad de las muestras estudiadas se obtuvo un buen ajuste entre N_0 y N-IA

(R^2= 0,735) (ver **Figura 3).** El modelo lineal ajustado fue

$$N_0 = 1{,}1305\ N\text{-}IA + 55{,}275$$

Figura 3: Relación entre el N potencialmente mineralizable (N0) y el N mineralizado en incubaciones anaeróbicas de 7 días (N-IA)



Echeverría *et al* (2000) encontraron una relación similar y con buen ajuste entre N_0 y N-IA trabajando con suelos de diversas regiones del país, y además concluyeron en que esta asociación no difirió entre años ni entre sistemas de manejo de cultivos. Los N_0 estimados mediante el uso de la ecuación fluctuaron entre 77 y 210 mg de N /kg de suelo por lo que el rango absoluto es solo 7% inferior al de los N_0 obtenidos con incubaciones aeróbicas de 20 semanas. Estos resultados permiten afirmar que esta técnica permite apreciar diferencias entre suelos y manejos diferentes y que es factible su empleo como alternativa rápida y sencilla para estimar el N_0.

Se efectuó la validación del modelo generado mediante contrastación de los resultados de las estimaciones de N_0 realizadas, empleándose para ello 6 pares de datos provenientes de lotes en uso agrícola: uno un suelo

Argiudol ácuico y otro un Argiudol vértico, que no habían sido utilizados en la generación del modelo, y se obtuvo un r = 0.75. Resulta importante remarcar que, si bien las incubaciones cortas de 7 días podrían constituir una técnica rápida y sencilla de estimación de N_0, cuando fueran utilizadas con fines diagnósticos de fertilidad nitrogenada los resultados requerirán ser complementados con la predicción del aporte de N a partir de los residuos de cultivos antecesores en descomposición (**Rice y Havlin,** 1994; **Studert** *et al*, 2000).

VII. Conclusiones

Existe una necesidad de encontrar procedimientos que permitan mejorar la eficiencia de uso de los fertilizantes nitrogenados para maximizar el beneficio económico y minimizar el riesgo de contaminación ambiental. Las incubaciones aeróbicas de largo plazo propuestas por Stanford y Smith, con correcciones por temperatura y humedad del suelo, permiten estimar la mineralización de N a partir de compuestos orgánicos durante el ciclo de cultivos agrícolas y en períodos de barbecho en los que se utilizan diferentes sistemas de labranza, pero este procedimiento no es práctico para el diagnóstico de fertilidad nitrogenada que debe realizarse en pocos días y habitualmente antes de la siembra de un cultivo. Por esa razón se ha trabajado en análisis rápidos que permitan obtener índices del N_0 en los suelos.

De las técnicas analizadas, la de incubaciones anaeróbicas de 7 días (N-IA) fue la que permitió un mejor ajuste con el N_0 de Stanford (R^2= 0,735), lo que permitiría efectuar razonables estimaciones de N_0 en función del N-IA. El modelo lineal ajustado fue

$$\mathbf{N_0 = 1{,}1305\ N\text{-}IA + 55{,}275}$$

Al momento de la siembra de los cultivos existe una considerable incertidumbre sobre las condiciones ambientales del período de desarrollo del cultivo y, por lo tanto, sobre la temperatura y humedad del suelo, por lo que es improbable estimar con alta precisión la cantidad de N que se mineralizará. Sin embargo, sí es posible realizar estimaciones en base a registros climáticos de largo tiempo que permitan establecer rangos del

N que se puede mineralizar en un período en particular, y contribuir de ese modo al diagnóstico de la fertilidad nitrogenada.

Otras determinaciones realizadas permitieron derivar las siguientes conclusiones:

- -Los potenciales de mineralización determinados en los diferentes trabajos realizados oscilaron entre 247 mg de N kg^{-1} de suelo en el caso de un suelo Vertisol, con varios años de siembra directa, y 95 mg de N kg^{-1} de suelo para un Argiudol vértico muy degradado por erosión hídrica. Entre estos valores extremos se presenta una gama relacionada al tipo de suelo y al manejo al que ha sido sometidos.
- -Las proporciones de N_0 que se mineralizaron durante el ciclo de diferentes cultivos fueron entre 13% y 28%, dependiendo de las condiciones de temperatura y humedad del periodo considerado.
- -El N_0 representó entre 6% y 12% del N total del suelo para las situaciones evaluadas.
- -El aporte por mineralización de las capas subsuperficiales contribuyó significativamente al N mineralizado en el suelo, por lo que deberían ser consideradas en su estimación, aunque las mediciones directas en muestras de estas capas lo sobreestimarían. Nuestras estimaciones indican que ese aporte sería de aproximadamente el 43% del N que se mineraliza en el horizonte superficial.
- -Considerando la influencia de la temperatura en el proceso de mineralización, resulta importante destacar la diferencia de 2ºC encontrada entre un suelo sin laboreo y uno trabajado durante el ciclo del cultivo de maíz.

Por estas razones y hechas las consideraciones precedentes, se considera haber hecho un aporte al conocimiento de la dinámica del N y a la posibilidad de cuantificación de la mineralización en los suelos agrícolas de nuestra provincia.

Reconocimiento

Han realizado Trabajos Finales de Graduación relacionados con este proyecto de investigación los Ings. Agrs. Juan Taborda, Fabián Pérez, María Alejandra Sterren, Diego Cian, Fabio Coullet, Mariela Heinze, Mercedes

Cagnani, Alejandra Verdejo, Natalia Esquivel, Walter Weis, Daniel Ale y Cristian Müller. Las copias de los mismos se encuentran disponibles para consulta en la Biblioteca de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Entre Ríos, en Oro Verde (Argentina).

Referencias bibliográficas

BENINTENDE M.; BENINTENDE S. (2001). Ajuste de un balance de nitrógeno en el cultivo de maíz por índices biológicos de mineralización en profundidad, en: **Actas XV Congreso latinoamericano y V cubano de la Ciencia del Suelo**: 70.

BENINTENDE M.; BENINTENDE S; ESQUIVEL N; VERDEJO A. (2003). Estimación del aporte de nitrógeno del suelo al cultivo de trigo, en: **Revista de Ciencia y Tenología**, UNSE Nº8:33-40.

BENINTENDE, M.C.; MULLER, C.; BENINTENDE, S.; STERREN, M. A. (2003). Índice del potencial de mineralización de nitrógeno en los suelos, en: **Revista Científica Agropecuaria** 7 (1): 51-55.

BENINTENDE S.; BENINTENDE, M. (1995). Biomasa microbiana en praderas en rotaciones ganadero agrícolas, fertilizadas con fósforo, en: **Revista de Investigaciones Agropecuarias** 26: 93-99.

BENINTENDE S.; BENINTENDE, M.; STERREN, M.; CAGNANI, M.; SÁNCHEZ, C. (2000). Efecto de dos sistemas de manejo sobre algunas propiedades biológicas del suelo, en: **Revista Ceres** 47 (273):533-542.

BORGETTO O; BENINTENDE M; BENINTENDE E. (1994). Potencial de mineralización de N en suelo, en: **Ciencia Docencia y Tecnología** 7: 3-22.

CABRERA M.; KISSEL, D. (1988) Potentially mineralizable nitrogen in disturbed and undisturbed soil simples, en: **SSSAJ** 52:1010-1015.

CABRERA M.; KISSEL, D.; VIGIL, M. (1994). Potential nitrogen mineralization: laboratory and field evaluation. En: Havlin JL, Jacobsen,J (eds) **Soil testing: Prospects for improving nutrient recommendations**. SSSA Sp. Pub. 40. Soil Sci.Soc. of Am:15–30.

CABRERA M. (2000). Ciclaje de nutrientes. Conferencia. Libro de Resúmenes XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata. Argentina.

CALVIÑO, P.A.; ECHEVERRÍA, H.E. (2003). Incubación anaeróbica del suelo como diagnóstico de la respuesta a nitrógeno del maíz bajo siembra directa, en: **Ciencia del suelo** 21(1): 24-29.

CAMPBELL C; MYERS R; WEIER, K.(1981). Potentially Mineralizable Nitrogen, Decomposition Rates and their Relationship to Temperature for Five Queensland Soils, en: **Soil Res**. 19: 323-332.

CASSMAN J.; MUNNS, D. (1980). Nitrogen mineralization as affected by soil moisture, temperature and depth. **SSSAJ** 44: 1233-1236.

CAVALLI, I; RODRIGUEZ, J. (1975). Efecto de la humedad en la mineralización del N en nueve suelos de la provincia de Santiago, en: **Ciencia e Investigación Agraria** 2 (8) 101-111.

CIAN D., STERREN M.; BENINTENDE M.; BENINTENDE, S. (2000). Ajuste de la tasa de mineralización de las capas subsuperficiales por distribución de microorganismos en profundidad. Actas electrónicas Nº 139 **Fertbio 2000**. XXIV Reuniao Brasileira de

Fertilidade e Nutricao de Plantas. Santa Maria, Brasil.
DARWICH N. (1998). **Manual de Fertilidad de suelos y uso de fertilizantes**. Mar del Plata: Gráfica Armedenho.
DÍAZ ZORITA, M.; DUARTE, G. (2000). **Diagnóstico y manejo de la fertilización**.
<http://www.e-campo.com/?event=news.search&form_search=diaz%20zorita%20duarte> [15/3/04]
ECHEVERRÍA H; BERGONZI E.; FERRARI J. (1994). Un modelo para estimar la mineralización de nitrógeno en suelos del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina), en: **Ciencia del Suelo** 12: 56-62.
ECHEVERRÍA H., SAN MARTÍN N.; BERGONZI R. (2000). Métodos rápidos de estimación de nitrógeno potencialmente mineralizable en suelos, en: **Ciencia del Suelo**.18 (1):9-16.
GARCÍA A.; MORÓN, A.. (1992). Estudios de C, N y P en la biomasa microbiana del suelo en sistemas de rotación agrícola, en: **INIA** 1: 111-126.
GIANELLO C.; BREMNER, J. (1986). Comparison of chemical methods of assessing potentially available organic nitrogen in soil, en: **Commun. In. Soil Sci. Plant Anal**., 17(2), 215-236.
HADAS A., FEIGENBAUM, S.; FEIGIN A; PORTNOY R. (1986). Nitrogen mineralization in profiles in differently managed soil types, en: **SSSAJ** 50: 314-319.
LÓPEZ BELLIDO, L. 1991. Cultivos Herbáceos. **Vol. 1 Cereales** Ediciones Mundi-Prensa Libros. Madrid. 539 p
MELCHIORI, R.; PAPAROTTI, O. (1996). Dinámica de la absorción de nitrógeno en trigo. Jo4rnada de actualización técnica en el cultivo de trigo. **Serie de extensión Nº 9 EEA INTA Paraná.**
OYANADEL C.; RODRÍGUEZ J. (1977). Estimación de la mineralización de Nitrógeno en el suelo, en: **Ciencia e Investigación Agraria** Vol4 Nº1: 32-44.
PLAN MAPA DE SUELOS. (1991). **Carta de suelos de la República Argentina. Departamento Diamante**. Paraná: INTA-Gobierno de Entre Ríos.
PRADO O; RODRÍGUEZ, J. (1978). Estimación de la necesidad de fertilización nitrogenada del trigo, en: **Ciencia e Investigación Agraria** Vol 5 Nsº 1 y 2:29-40.
RICE CW; HAVLIN, J.L. (1994) Integrating mineralizable nitrogen indices into fertilizer nitrogen recommendations. En: Havlin JL, Jacobsen,J (eds) **Soil testing: Prospects for improving nutrient recommendations**. SSSA Sp. Pub. 40. Soil Sci.Soc. of Am.: 1-13.
STANFORD, G; SMITH, S. (1972). Nitrogen mineralization potentials of soils, en: **SSSAP**. 36: 465-472.
STANFORD, G. (1982). Assessment of soil nitrogen availability. En: F. Stevenson (ed.) **Nitrogen in Agricultural Soils. Agronomy** 22: 651- 683.
STERREN, M; BENINTENDE, S; BENINTENDE M. (2001). Comparación de índices para estimar el N potencialmente mineralizable en el suelo. En: **III Reunión Nacional científico-técnica de biología del suelo III Encuentro sobre fijación biológica del nitrógeno**. Salta: 313.
STUDERT, G.A; CARABACA, L.S; ECHEVERRÍA, H.E (2000) Estimación del nitrógeno mineralizado para un cultivo de trigo en distintas secuencias de cultivo, en: **Ciencia del Suelo** 18 (1): 17-27.
WARING, S; BREMNER, J. (1964). Ammonium production in soil under waterlogged conditions as an index of nitrogen availability, en: **Nature** 201:951-952.