

ANÁLISIS DE UN MODELO DE MINERALIZACIÓN DE NITRÓGENO EN SUELOS DEL OESTE DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES

J. O. Sierra y L. A. Barberis (1)

Recibido: 14/9/82

Aceptado: 20/4/83

RESUMEN

Se analiza la consistencia y validez de un modelo de mineralización de nitrógeno de primer orden cinético, en suelos de la zona oeste de la provincia de Buenos Aires. Los datos se obtuvieron de incubaciones durante 36 semanas en condiciones controladas.

Se establece la función que relaciona el nitrógeno mineralizado y el tiempo, proponiéndose una evaluación del Nitrógeno Potencialmente Mineralizable (No) basada en el método de aproximación por diferencias finitas centrales y se la compara con la estimación estadística de Stanford *et al.*

ANALYSIS OF A NITROGEN MINERALIZATION MODEL IN WESTERN BUENOS AIRES SOILS

SUMMARY

The validity and consistency of a first order kinetics model for nitrogen mineralization for Western Buenos Aires soils is analyzed. The experimental data are obtained from 36 weeks of incubations under controlled conditions.

The functional relationship of mineralized nitrogen vs time is established. An evaluation of Potentially Mineralizable Nitrogen based in central difference method of approximation is proposed and compared with the statistical estimation of Stanford *et al.*

INTRODUCCION

Es conocida la importancia del nitrógeno en el crecimiento y desarrollo de los vegetales y mucho es, aún, lo que resta por conocerse acerca de las formas químicas en que se halla en el suelo y del modo en que se efectúa el pasaje de unas a otras, hasta llegar a estar disponibles para los cultivos (Alexander, 1977).

Se admite que la complejidad constitutiva de la materia orgánica (reservorio de más

del 90 por ciento del N del suelo) ha sido un gran obstáculo hallado por los distintos investigadores, ésto explica el desconocimiento actual acerca de ciertas formas orgánicas de este elemento, las cuales representan, aproximadamente, un 40 por ciento del N total del suelo (Bremmer, 1967).

Respecto del proceso de mineralización, a través del cual el nitrógeno pasa de formas orgánicas a inorgánicas asimilables, puede decirse que su conocimiento es somero; Stan-

(1) Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes, Departamento de Suelos, Facultad de Agronomía, Av. San Martín 4453, (1417) Buenos Aires, Argentina.

ford *et al.* (1972) proponen un modelo de mineralización de primer orden cinético, a partir del cual estiman el Nitrógeno Potencialmente Mineralizable de los suelos (No), definido como la cantidad de nitrógeno orgánico del suelo que es susceptible de ser mineralizado de acuerdo a una cinética de primer orden.

El objetivo de este trabajo es, en primer lugar, probar la consistencia y validez de dicho modelo para datos experimentales obtenidos durante 36 semanas de incubación de suelos, calculando previamente la función que relaciona el nitrógeno mineralizado y el tiempo; en segundo lugar, se propondrá una evaluación del No, basada en una técnica de cálculo numérico.

MATERIALES Y METODOS

Suelos

Se utilizaron muestras superficiales de 14 suelos pertenecientes a otros tantos campos, situados en el oeste de la provincia de Buenos Aires y que integran la Red de Ensayos de fertilización en trigo del Convenio AACREA - FAUBA - LAQUIGE (Barberis, *et al.*, 1980).

Del total de muestras, extraídas previas a la siembra y fertilización, 7 pertenecen a la Campaña 78/79 y 7 a la Campaña 79/80 del citado trabajo.

Método del nitrógeno potencialmente mineralizable (No)

La metodología utilizada fue básicamente la citada por Stanford, *et al.* (1972), modificada por Barone (1979).

Se realizaron incubaciones de suelo en condiciones controladas de temperatura y humedad, trabajándose a 35°C y asegurando en los suelos una cantidad de agua retenida equivalente a Capacidad de Campo, factores considerados en el nivel óptimo para el pro-

ceso de mineralización del nitrógeno (Stanford *et al.*, 1972).

El nitrógeno mineralizado (medido como nitratos), fue extraído en periódicos lavados con 100 ml de cloruro de calcio 0,01M y medidos colorimétricamente, utilizando el método del fenol disulfónico (Jackson, 1964); se realizó un lavado previo al inicio de la incubación con el objeto de eliminar los nitratos que hubiese en los suelos.

Para llevar los suelos a Capacidad de Campo, luego de cada lavado y antes de continuar las incubaciones, se diseñó un sistema de percolación con dispositivo de vacío y manómetro, con el cual se logra que el agua del suelo quede retenida a 0,33 Bar*.

Se hicieron mediciones de nitratos a las 2, 4, 8, 12, 16, 23, 29 y 36 semanas.

RESULTADOS Y DISCUSION

Las mediciones de NO₃ en las sucesivas percolaciones figuran en el Cuadro 1.

Nitrógeno mineralizado en función del tiempo

Graficando la relación entre el nitrógeno mineralizado acumulado a cada medición (en adelante Nac) y el tiempo, se obtienen curvas del tipo mostradas en la Figura 1, para 3 de los suelos estudiados; puede observarse que el N mineralizado crece al principio rápidamente y ese crecimiento disminuye paulatinamente con el transcurso del tiempo de incubación, este hecho ya fue observado por otros autores (Stanford, *et al.*, 1972; Stanford, *et al.*, 1974; Barrow, 1967).

Este tipo de curvas se pueden aproximar a funciones potenciales de la forma

$$y = ax^b \quad \text{con } b/0 < b < 1$$

Para el caso en estudio, "y" es el Nac al tiempo "x"; "a" y "b" son constantes particulares a cada suelo.

* El sistema fue diseñado conjuntamente con la Lic. en Ciencias Físicas Liliana Di Pietro. Una descripción del sistema se halla en Sierra (1982).

CUADRO 1: Nitrógeno mineralizado medido en los sucesivos períodos (ppm NO₃).

suelo	0-2	2-4	4-8	8-12	12-16	16-23	23-29	29-36
1	149	87	122	92	84	115	163	97
4	120	86	90	72	58	96	139	81
7	150	85	126	81	73	116	142	92
10	142	118	114	75	80	119	115	104
13	147	106	148	93	89	137	153	83
16	93	131	101	70	96	113	151	93
20	57	93	63	29	63	69	102	74
63	118	79	132	87	85	116	111	84
66	131	93	129	72	99	112	132	75
69	96	171	200	129	90	204	139	101
72	147	147	204	98	61	193	154	91
75	122	80	121	105	75	118	113	73
78	167	107	173	105	98	153	155	91
81	145	85	144	83	93	122	132	82

Stanford, *et al* (1972) mencionan una relación lineal entre el Nac y la raíz cuadrada del tiempo; este tipo de relación implica una función potencial entre el Nac y el tiempo, con exponente igual a 0,5, tomando este valor como un promedio de todos los suelos, citándose, sin embargo, excepciones.

En el Cuadro 2 se muestran para los suelos de este trabajo, la ecuación de la función potencial y el coeficiente de correlación hallado en el ajuste estadístico para dicha función.

CUADRO 2: Ecuación de la función potencial que relaciona el nitrógeno mineralizado y el tiempo (Nac = at^b) y coeficiente de correlación del ajuste estadístico.

Suelo	a	b	r
1	97,9	0,618	0,998 *
4	82,4	0,607	0,994 *
7	100,9	0,597	0,998 *
10	102,6	0,597	0,991 *
13	100,4	0,637	0,996 *
16	68,2	0,713	0,977 *
20	43,1	0,713	0,964 *
63	78,1	0,665	0,997 *
66	89,2	0,635	0,996 *
69	72,7	0,805	0,962 *
72	107,1	0,668	0,981 *
75	80,6	0,655	0,998 *
78	112,5	0,633	0,997 *
81	96,6	0,625	0,998 *

* significativo al nivel del 1%.

Como puede apreciarse, cada suelo muestra valores de "a" y "b" específicos, no pudiéndose calcular un promedio sin cometer un error apreciable; sin embargo es interesante destacar que, aquellos suelos que presentan un mejor ajuste estadístico, tienen un exponente similar y promediando 0,6.

El conocimiento de la relación entre el N mineralizado y el tiempo, hace posible, en un paso posterior, el cálculo del No, basado en un modelo que se analiza a continuación.

Un modelo de mineralización de nitrógeno: validez y consistencia

Stanford, *et al* (1972) proponen que la cantidad de nitrógeno mineralizado por unidad de tiempo es proporcional a la cantidad de nitrógeno potencialmente mineralizable que existe en el suelo, y esto es expresado matemáticamente con la ecuación de primer orden cinético

$$\frac{dN}{dt} = -kN$$

siendo "dN" la variación de la cantidad de nitrógeno potencialmente mineralizable en el suelo, en un tiempo dado "dt", y "N" es el nitrógeno potencialmente mineralizable que

queda en el suelo al tiempo "t"; "k" es una constante de mineralización.

Se probará aquí la consistencia del modelo con el objeto de averiguar la validez del mismo para los datos experimentales obtenidos, se utilizará para ello la aproximación por diferencias finitas centrales (Smith, 1977).

Puede decirse de esta manera que:

$$\frac{dN}{dt} \cong \frac{\Delta N}{\Delta t}$$

siendo

$$\Delta N = N(t_2) - N(t_1) \quad [1]$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 \quad [2]$$

$N(t_i)$ es el nitrógeno potencialmente mineralizable presente en el suelo al tiempo " t_i ".

Además, se tiene que

$$N(t_2) = N_0 - N_{ac}(t_2) \quad [3]$$

$$N(t_1) = N_0 - N_{ac}(t_1) \quad [4]$$

siendo $N_{ac}(t_i)$, el nitrógeno mineralizado acumulado al tiempo " t_i ".

Por deducción de lo anterior, se tiene que

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{N_{ac}(t_1) - N_{ac}(t_2)}{t_2 - t_1} \quad [5]$$

De [3] y [4] se tiene que

$$N(t_i) = N_0 - N_{ac}(t_i) \quad [6]$$

Por la técnica que se utiliza, el " t_i " que se debe tomar es el tiempo intermedio del intervalo considerado

$$t_i = \frac{t_1 + t_2}{2} \quad [7]$$

Por [5], [6], y [7] se tiene que

$$\frac{N_{ac}(t_1) - N_{ac}(t_2)}{t_2 - t_1} = -k N_0 + k N_{ac}(t_i) \quad [8]$$

La consistencia del modelo se prueba, entonces, mediante análisis de regresión lineal:

siendo

$$Y = a + bx$$

$$y = \Delta N / \Delta t$$

$$x = N_{ac}(t_i)$$

$$a = -kN_0$$

$$b = k$$

Los N_{ac} de los tiempos intermedios fueron calculados a partir de la ecuación de la función potencial que relaciona el N_{ac} y el tiempo, y que fueron comentadas en el punto anterior.

La curva de regresión hallada y los coeficientes de correlación calculados se presentan en el Cuadro 3.

Como puede apreciarse, el grado en que los datos experimentales se ajustan al modelo es variable según el suelo considerado. Si se toma el modelo de primer orden cinético como una aproximación al proceso real, puede decirse que para algunos suelos, dicha aproximación "funciona" mejor que en otros.

Cabe aquí, mencionar algunas consideraciones que explicarían la variabilidad hallada. En la ecuación tomada como modelo de mineralización, se considera que la declinación del N mineralizado en el tiempo, tiene por causa únicamente la menor cantidad de N mineralizable que va quedando en el suelo. Sin embargo, si se considera que existen formas de N orgánico con distinta susceptibilidad a ser atacadas por la flora microbiana, la declinación mencionada tendría como causa, también, la mayor resistencia al ataque, del material que va quedando en el suelo.

Otro factor que podría influir, es la po-

CUADRO 3: Curva de regresión, coeficiente de correlación y Nitrógeno potencialmente mineralizable (No_1), calculados en la prueba de consistencia del modelo de mineralización.

Suelo	a ($-kNo_1$)	b (k)	r	No_1 [ppm NO_3^-]
1	- 58,9	0,0602	0,796 *	978
4	- 49,9	0,0639	0,790 *	781
7	- 60,1	0,0668	0,811 *	900
10	- 63,7	0,0717	0,838 **	888
13	- 63,9	0,0617	0,868 **	1.036
16	- 49,8	0,0491	0,724 *	1.014
20	- 31,5	0,0476	0,618	662
63	- 50,9	0,0552	0,892 **	922
66	- 56,7	0,0619	0,862 **	916
69	- 64,2	0,0452	0,788 *	1.420
72	- 73,3	0,0611	0,860 **	1.200
75	- 56,7	0,0754	0,924 **	752
78	- 71,1	0,0628	0,875 **	1.132
81	- 59,9	0,0630	0,854 **	951

* Significativo al nivel del 5%.

** Significativo al nivel del 1%.

blación microbiana y su actividad: si la producción de los organismos amonificadores abasteciera sin limitaciones a la flora nitrificadora-nitrificadora, o sea: si la velocidad del pasaje de amonio a nitrato es independiente de la de amonificación, el ajuste al modelo (a igualdad de otros factores) sería mayor, que en la situación inversa (Navarro, *et al.*, 1980).

Lo dicho aquí, mostraría que en los suelos donde la cantidad de N mineralizable es la principal limitante, el ajuste de los datos al modelo de primer orden cinético sería mayor, suelos que presentan más de una limitante, se alejaría de dicho modelo.

Evaluación del nitrógeno potencialmente mineralizable por cálculo numérico

Aplicando el método de aproximación por diferencias finitas centrales, desarrollado en el punto anterior, se observa que en la ecuación [8], dividiendo la ordenada al origen por la pendiente, se obtiene el valor del No (en adelante al No calculado de esta manera se lo designará como No_1).

Los valores así obtenidos para cada suelo se muestran en el Cuadro 3.

Si se asume la validez de la aproximación del modelo de primer orden, la única fuente de error posible deviene de la técnica de cálculo numérico utilizada, y siendo este error, función creciente del Δt utilizado, puede ser disminuido, disminuyendo el intervalo de medición.

Estimación estadística del No según el método de Stanford

Un método de estimación estadística del No de los suelos es desarrollado por Stanford, *et al.* (1972), a partir del modelo citado; dicho método consiste en su integración matemática. De esta manera se obtiene:

$$\ln (No - N_{ac}) = \ln No - kt$$

siendo No y k , los parámetros desconocidos.

Luego se propone una estimación estadística del No (en adelante al No así estimado se lo denominará No_2) para luego obtener "k" mediante un análisis de regresión lineal entre $\ln (No - N_{ac})$ y "t", utilizando el criterio del mejor coeficiente de correlación por iteraciones sucesivas del No_2 .

El No_2 , el "k" estimados, se muestran en el Cuadro 4.

CUADRO 4: Nitrógeno potencialmente mineralizable (No_2) y constante de mineralización (k) estimados según el método de Stanford.

Suelo	No_2 [ppm NO_3^-]	k
1	1.780	0,0181
4	1.590	0,0158
7	1.510	0,0255
10	1.380	0,0248
13	1.440	0,0287
16	1.510	0,0250
20	1.210	0,0155
63	1.180	0,0309
66	1.250	0,0295
69	1.450	0,0415
72	1.480	0,0359
75	1.120	0,0339
78	1.500	0,0317
81	1.300	0,0299

Como se observa, una diferencia significativa entre las dos evaluaciones vistas, es la magnitud del valor obtenido; el No_2 es, en promedio, un 50% mayor que el No_1 , siendo notable asimismo, la ausencia de asociación entre ellas ($r = 0,368$), lo que por lógica implica la imposibilidad de validez conjunta.

Validez de la evaluación del No por cálculo numérico: asociación del No con el nitrógeno mineralizado

Es razonable pensar que el No de un suelo debiera estar relacionado con el Nac a un tiempo dado, pues aquel no es más que el Nac al "t" en que el suelo "llega" a su No , de esta manera, y conociendo esa relación, podría estimarse el No a partir de datos obtenidos en incubaciones de tiempo corto.

Si se considera un grupo de suelos, esa relación, aunque válida, tendría características relativas al tiempo en el cual se la analiza. Observando curvas del tipo mostradas en la Figura 1, se puede imaginar, como perfecta-

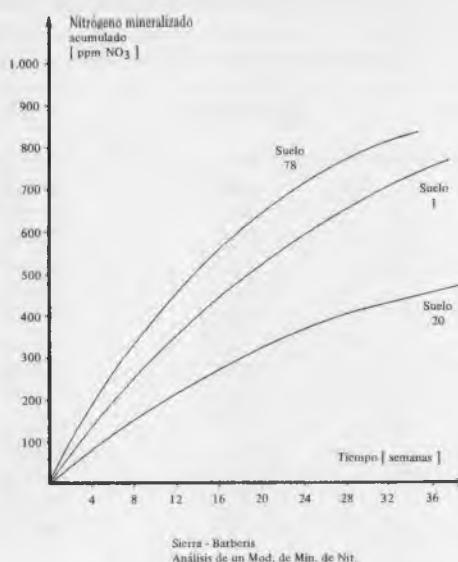


Figura 1: Nitrógeno mineralizado en función del tiempo, para 3 de los suelos estudiados.

mente factible, que dichas curvas se interseccionen, sobre todo en "t" reducidos, para luego comenzar a "separarse".

Como deducción de esto, podría concluirse que es dable esperar mayor asociación entre el Nac de "t" mayores con el No , que con los Nac de las primeras semanas. Estas correlaciones fueron calculadas para las dos evaluaciones del No presentadas en este trabajo y se muestran en el Cuadro 5.

CUADRO 5: Correlaciones entre el nitrógeno mineralizado a cada medición (Nac) y las evaluaciones del Nitrógeno potencialmente mineralizable (No_1 y No_2).

Nac	No	
	No_1	No_2
Nac_2 ***	0,568 *	0,361
Nac_4	0,804 **	0,467
Nac_8	0,884 **	0,314
Nac_{16}	0,896 **	0,278
Nac_{29}	0,922 **	0,355
Nac_{36}	0,928 **	0,383

* Significativo al nivel del 5%.
 ** Significativo al nivel del 1%.
 *** Nac_2 es el nitrógeno mineralizado a la 2^o semana y así sucesivamente.

Como puede observarse en dicho Cuadro, para el No_1 se confirma la tendencia discutida en este punto, presentando coeficientes de correlación significativos y crecientes al considerar Nac de tiempos crecientes; el No_2 no evidencia tal tendencia, no mostrando asociación con los Nac . Esto demostraría, en primera instancia, la congruencia del método de evaluación propuesto aquí.

CONCLUSIONES

La relación hallada entre el N mineralizado y el tiempo, para los datos obtenidos, ha sido aproximada a una función potencial. Es destacable el hecho que los suelos que presentan mejor ajuste a esta función, posean un exponente cercano a 0,6, es decir, que la velocidad de acumulación del nitrógeno es del mismo orden.

Esta relación funcional se utilizó en el análisis del modelo de primer orden cinético. Los datos experimentales se han ajustado a él en mayor o menor grado, según el suelo considerado. Esto supone que el modelo no es apropiado en todos los casos para explicar el proceso de mineralización, probando ser una aproximación válida a primer orden.

Cabe destacar que el modelo, además, parte del supuesto de la existencia de una fracción mineralizable medible (No), esto es una hipótesis y debería ser considerado en futuros trabajos, una definición más exacta de ella.

Una aproximación mayor al proceso real, debería contemplar el N mineralizado no sólo como nitrato sino también como amonio y, el estudio de las fracciones orgánicas del nitrógeno involucradas, mediante fraccionamientos químicos, antes y durante las incubaciones.

Se obtuvo una evaluación del No mediante cálculo numérico, que ha demostrado ser la más apropiada, de las dos analizadas, para estos suelos. Dicha evaluación ha mostrado estar asociada al nitrógeno mineralizado acumulado, por lo que podría estimarse el No a partir de incubaciones de tiempos cortos.

Quedaría por analizar, en trabajos futuros, la posibilidad de utilizar este parámetro como índice de la fertilidad nitrogenada a mediano y largo plazo.

AGRADECIMIENTO

A la Lic. en Ciencias Físicas Liliana Di Pietro, por su colaboración en el análisis matemático.

BIBLIOGRAFIA

- 1) Alexander M., 1977. Introduction to soil microbiology; ed. John Wiley and sons, New York; 456 pp.
- 2) Barberis L., M. Conti, H. del Campo, A. Nervi y P. Daniel, 1980. Respuesta del trigo a la fertilización nitrogenada en el norte y oeste de la Pampa Húmeda, Campañas 1978/79 y 1979/80; Actas de la IX Reunión Argentina de la Ciencia del Suelo, Tomo II: 537-548.
- 3) Barone C., 1979. Nitrógeno potencialmente mineralizable de los suelos; Trabajo de Intensificación, Cát. de Edafología, Depto. de Suelos de la FAUBA; 13 pp.
- 4) Barrow N., 1967. Studies on extraction and availability to plants of absorbed plus soluble sulfato; *Soil Science*, 104 (4): 242-249.
- 5) Bremmer J. M., 1967. Nitrogen Compounds, 19-58, en *Soil Biochemistry*; Mc Laren y Peterson editores; Londres; 471 pp, Tomo I.
- 6) Jackson M., 1964. Análisis químico de suelos; ed OMEGA S.A.; Barcelona; 662 pp.
- 7) Navarro C., H. Echeverría, N. Gonzalez y M. Iglesias, 1980. Cinética de las reacciones de amonificación y nitrificación en algunos suelos de la República Argentina; Actas de la IX Reunión Argentina de la Ciencia del Suelo, Tomo II: 431-437.
- 8) Sierra J., 1982. Evaluación de formas de nitrógeno disponible en suelos del oeste de la provincia de Buenos Aires; Trabajo de Intensificación, Cát. de Fertilidad y Fertilizantes, Depto. de Suelos de la FAUBA; 60 pp.
- 9) Smith J., 1977. Mathematical modeling and digital simulation for engineers and scientists; ed John Wiley and sons, New York; 332 pp.
- 10) Stanford G., J. Carter y S. Smith, 1974. Estimates of potentially mineralizable soil nitrogen based on short-term incubations; *Soil Science*, 38: 99-102.
- 11) Stanford G. and S Smith, 1972. Nitrogen mineralization potentials of soils; *Soil Science*, 36: 465-472.