

MODELO MATEMÁTICO APLICADO A LA DINÁMICA DEL NITRÓGENO EN SUELOS MANEJADOS CON PRADERAS DEL SUR DE CHILE

PAULINA ALEJANDRA SALAZAR ESPINOZA¹; JUAN ALFREDO GÓMEZ FERNÁNDEZ¹
& PEDRO ANTONIO NÚÑEZ RAMOS²

Recibido: 12-02-11

Recibido con revisiones: 27-05-11

Aceptado: 28-05-11

MATHEMATICAL MODEL APPLIED TO THE DYNAMICA OF NITROGEN IN SOILS UNDER PASTURE IN SOUTHERN CHILE

ABSTRACT

The fertilization efficiency program in pasture systems for improving livestock feeding is very important for farmers in southern Chile. This paper reformulates a mathematical simulation model proposed to describe the concentration of total nitrogen (NT) in soil, in order to fit real experimental data. The objective was to determine the appropriate fertilization strategies in pastures and their direct use by livestock. Critical assumptions consisted, first, in that the concentration of TN in the soil depends on the concentration of its three major components: organic nitrogen (N-NO), nitrate nitrogen (N-NO₃⁻) and ammonium nitrogen (N-NH₄⁺) and second, that the behavior of the concentration of these components depends strongly on the season of the year and, therefore, the coefficients in the model must be different for each season and third, that only the first 10 cm of the soil profile are meaningful for pasture growth. The modified model consists of a system of partial differential equations (PDE), which consists of EDP's for N-NO and N-NO₃⁻, while N-NH₄⁺ was interpolated by a polynomial with the degree varying with the season. The model parameters were calculated solving a functional least squares sum of residuals, using the experimental data. We used optimization methods to solve the problem of least squares. The model used initial data and boundaries approximated by polynomials for each season of the year. The resulting parameters were two: A Quasi-Newton (BFGS) and a Genetic Algorithm (GA). The combination of these algorithms was used to avoid possible local minima and to find a global minimum. The GA was used systematically to find good reference points, which gave BFGS as the initial solution. This combination worked well as all the parameters found globally minimized the residual sum of squares.

The results showed that the proposed model was significantly adapted to the data (with a 3% maximum error); therefore, the parameters obtained can be considered for the model for the soil type and season accordingly.

Key words. Mathematical model, pasture, nitrogen, grazing.

RESUMEN

La eficientización de la fertilización en los sistemas prateros, son una necesidad para los ganaderos del sur de Chile, por su importancia en la alimentación del ganado. El objetivo fue reformular un modelo matemático de simulación propuesto para describir la concentración de nitrógeno total (NT) en el suelo, a fin de determinar las estrategias de fertilización adecuada en pradera para el cultivo de especies y su utilización en la alimentación del ganado, ajustando los datos experimentales reales a los simulados. Las hipótesis básicas consistieron, primero, que la concentración de NT en el suelo depende de la concentración de sus tres componentes principales: nitrógeno (N) orgánico (N-NO), nitrato (N-NO₃⁻) y amonio (N-NH₄⁺); segundo, que el comportamiento de la concentración de estos componentes depende fuertemente de la estación del año y por tanto, los coeficientes en el modelo deben ser distintos para cada estación y tercero, que la porción de suelo que es significativa para el crecimiento de la pradera está entre los primeros 10 cm de profundidad. El modelo modificado está formado por un sistema de ecuaciones diferenciales parciales (EDP), el cual consta de EDP's para N-NO y N-NO₃⁻; en tanto, N-NH₄⁺ fue interpolado por un polinomio cuyo grado varió con la estación. Los parámetros del modelo se calcularon resolviendo un problema de mínimos cuadrados con funcional suma de residuales, utilizando los datos experimentales. Se utilizaron los métodos de optimización para resolver el problema de mínimos cuadrados. El modelo utilizó datos iniciales y de borde aproximados por polinomios para cada estación del año. Los parámetros resultantes fueron dos: un Quasi-Newton (BFGS) y un Algoritmo Genético (AG). La combinación de estos algoritmos tuvo como propósito evitar en lo posible los mínimos locales y encontrar un mínimo global. El AG se utilizó sistemáticamente para hallar buenos puntos de referencia, los cuales se le daban a BFGS como solución inicial. Esta combinación funcionó satisfactoriamente pues todos los parámetros encontrados minimizan globalmente la suma de cuadrados residuales. Los resultados mostraron que el modelo propuesto se adaptó de manera significativa a los datos (con 3% de error máximo), por lo tanto, los parámetros obtenidos pueden considerarse los correspondientes al modelo para el tipo de suelo y estación del año correspondiente.

Palabras clave. Modelo matemático, pradera, nitrógeno, pastoreo.

¹ Facultad Ingeniería Ciencias y Administración, Centro de Modelación y Computación Científica Universidad de La Frontera. Casilla 54-D. Temuco. Chile.

² Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, República Dominicana. Autor para correspondencia: paulinasalazarespinoza@gmail.com

INTRODUCCIÓN

La zona templada de Chile posee excelentes condiciones para el desarrollo de sistemas de producción pecuaria basados en el pastoreo de praderas permanentes, ésta es una fuente de alimento de bajo costo para el ganado bovino. El uso directo de la pradera por los animales constituye la fuente de alimento más abundante para el ganado y cuando se utiliza correctamente, representa la opción de menor costo.

El aumento del negocio de carne bovina en la Región de la Araucanía y la Región de Los Lagos de Chile (Sur), ha llevado a un incremento en la explotación de la pradera a la cual, para obtener recursos de calidad y cantidad, incorpora múltiples tipos de fertilizantes. Ello aumenta las pérdidas de N al medio ambiente, lo que causa pérdidas económicas por la adquisición innecesaria de nutrientes y daño ambiental. Por ello se han realizado una gran variedad de trabajos relacionados con concentración de N, tanto en la modelación como en los métodos de ajuste de parámetros, con el fin de mejorar el uso de los recursos (Marinov & Diminescu, 2008) y la producción de materia seca.

Los primeros modelos utilizados estaban enfocados a objetivos específicos como la evaluación de la volatilización de amonio (Parton *et al.*, 1981) y eran simulados con algoritmos numéricos de baja complejidad (Frissel & Van Veen, 1981). Actualmente, los modelos y métodos numéricos se han vuelto más globales. Aún no existe un sistema que simule y se adapte a todo tipo de suelo y condiciones de fertilización, pues se requiere conocer los valores apropiados de los parámetros por los algoritmo de cálculo y cuanto más global más complejo se vuelve el modelo. Por lo tanto se necesita de más parámetros, de manera que la incertidumbre asociada a los mismos, dificultará el éxito de su aplicación. Otras limitantes son la obtención de condiciones iniciales del modelo (De Willingen, 1991; Schmied *et al.*, 2000) y obtener datos de campo, los cuales sirven para realizar simulación inversa (Ritter, 2002).

Existen también modelos de N total (Schmied, 2000; Rodríguez, 2003), los cuales son propuestos para condiciones de suelo y tipo de clima distinto a los que se encuentran en el sur de Chile, están basados en la ecuación de difusión.

El objetivo de este artículo fue determinar los parámetros que describen la dinámica de nitrógeno total medido bajo condiciones naturales (datos de campo) considerando que los procesos pueden variar significativamente de una estación del año a otra, recurriendo a un modelo de

predicción modificado basado en el modelo CERES (Gabrielle and Kengni, 1996; Kiniry, 1986), adaptando a nuestros requerimientos el sistema de EDP. Además, encontrar condiciones iniciales y de borde extrapolando los datos obtenidos experimentalmente y luego suavizándolos mediante un ajuste polinómico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Datos experimentales y localización

El experimento se realizó en un suelo Freire (Andisol) de la Estación Experimental Maquehue, Universidad de La Frontera, Región de La Araucanía, 38°50' LS, 72°42', 70 ms.n.m. durante la temporada primavera 2005 a invierno 2006 (Núñez *et al.*, 2010a; Núñez *et al.*, 2010b). Las características químicas de este suelo son reportadas por Nuñez *et al.* (2010a) en base al CIREN (2003) y resultados de laboratorio en el predio.

Los datos de N fueron obtenidos en unidades experimentales en un diseño de bloques completos al azar, con tres repeticiones y 2 tratamientos, durante cuatro estaciones 2005-2006. Los tratamientos aplicados fueron un pastoreo intenso (PI), y un pastoreo suave (PS).

El PI consistió en entradas de los animales al pasto con disponibilidad entre 1,500-2,200 MS kg ha⁻¹, variando con la estación. Mientras que las salidas oscilaron entre 1,000-1,200 MS kg ha⁻¹ (Núñez *et al.*, 2010a; Núñez *et al.*, 2010b). El PS consistió en entradas de los animales al pasto con disponibilidad entre 1,300-2,600 MS kg ha⁻¹, variando con la estación. Mientras que las salidas oscilaron entre 1,300-1,600 MS kg ha⁻¹ (Núñez *et al.*, 2010a; Núñez *et al.*, 2010b).

Los muestreos de suelo se realizaron en una pradera permanente de ballica (*Lolium perenne* L.), festuca (*Festuca arundinacea* Schreb.) y pasto ovilla (*Dactylis glomerata* L.), asociados a trébol blanco (*Trifolium repens* L.). Su fertilización se realizó de acuerdo a lo reportado por Nuñez *et al.* (2010a).

Los dos tipos de pastoreos fueron realizados por vacas secas Holsteins Friesian con peso promedio de 400 kg, carga animal promedio del año fue de 2.1 unidades de animales ha⁻¹. El manejo de los animales en pastoreo se realizó de acuerdo a lo reportado por Nuñez *et al.* (2010a).

El muestreo de suelos se realizó antes y después de cada evento de pastoreo a una profundidad de 0 a 10 cm para el análisis químico de N inorgánico disponible (N-NO₃⁻ y N-NH₄⁺), N orgánico y NT (nitrógeno total).

El N inorgánico, total y orgánico en el suelo

El N disponible fue determinado como amonio y nitrato por (N-NO₃⁻ y N-NH₄⁺, respectivamente) por el método de

extracción y destilación con KCl (2M) descrito por Sadzawka *et al.* (2000). El contenido de N fue determinado considerando la concentración de N disponible en el suelo (mg kg^{-1}), la densidad promedio del suelo (0.692 g/cm^3). El N total fue determinado por digestión Kjeldahl de acuerdo al método descrito por Sadzawka *et al.* (2001). Las concentraciones de N total fueron expresadas en % y recalculado en (mg kg^{-1}). El N orgánico fue calculado por diferencia entre el N total y el N inorgánico.

El modelo matemático aplicado utilizó una base de datos meteorológicos de las condiciones de campo donde se desarrolló el experimento obtenidos de la Dirección Meteorológica Maquehue, Chile (2005-2006) y medición en terreno de la temperatura del suelo a 5 cm de profundidad (Núñez, 2008).

Modelo matemático aplicado

El modelo en el cual se basa este trabajo, simula los datos de un Andisol acidificado, cada ecuación contiene un término difusivo, un término de transporte convectivo de agua y un término de velocidad de reacción. Este balance de masa para un flujo radial desde una fuente y hacia una salida fue descrita por Abbis *et al.* (1996). Las ecuaciones fueron derivadas planteando los balances de materia a un elemento diferencial de longitud de lisímetro. El modelo considera un esquema de flujo convectivo de los nutrientes (flujo de pistón) en concordancia con el modelo CERES (Jones & Kiniry, 1986; Gabrielle & Kengni, 1996) considerando que solo existe un tipo de agua en la matriz sólida. El modelo utilizado en este artículo es una modificación del sistema de EDP, el cual básicamente se simplificó para obtener un mejor ajuste a los datos experimentales de amonio. Los parámetros referenciales (Tabla 1) reportados incluyen coeficiente de difusión, coeficiente convectivo del agua, velocidad máxima de crecimiento de microorganismos, coeficiente de rendimiento de los microorganismos respecto al N, constante de saturación y constante de velocidad de mineralización.

El sistema de EDP considera los datos de amonio ajustados a un polinomio, el cual varía según la estación del año, por lo tanto se elimina la EDP de hidrógeno. El oxígeno se mantiene constante, su valor será de 4 mg L^{-1} .

El modelo a ser ajustado es:

$$\text{Nitrogeno} \quad \frac{\partial [N]}{\partial t}(z,t) = D \frac{\partial^2 [N]}{\partial z^2}(z,t) - v \frac{\partial [N]}{\partial z}(z,t) + r_N \tag{Ecuación 1}$$

$$\text{Amonio} \quad NH_4 = f(t) = a_n t^n + a_{n-1} t^{n-1} + \dots + a_0 \tag{Ecuación 2}$$

$$\text{Nitrito} \quad \frac{\partial [NO_3]}{\partial t}(z,t) = D_1 \frac{\partial^2 [NO_3]}{\partial z^2}(z,t) - v_1 \frac{\partial [NO_3]}{\partial z}(z,t) + r_{NO_3} \tag{Ecuación 3}$$

donde: velocidad de reacción del

$$Nr_N = - \frac{r_{MO}}{Y_{xN}}$$

velocidad de crecimiento de microorganismos

$$r_{MO} = \mu_{\max} [O_2] r_{MO} = \mu_{\max} [O_2]$$

velocidad de reacción del nitrato

$$r_{NO_3} = k_n [NH_4][O_2]^2$$

La condición inicial está dada por: $u_i(z,0) = h_i(z)$ en $t=0$ $\forall z$, con $z \in [0, L]$ $u_i(z,0) = h_i(z)$ en $t=0 \forall z$, con $z \in [0, L]$

donde u_i u_i corresponde a las diferentes concentraciones de las especies, con $i = \{1,2\}$ $i = \{1,2\}$ donde u_1 u_1 es N orgánico y u_2 u_2 es nitrato.

La condición inicial indica que para el tiempo $t=0$ se conoce la concentración de todos los compuestos para cualquier profundidad, se obtuvo a partir de aproximaciones polinómicas de los datos experimentales en las estaciones otoño, invierno,

Tabla 1. Descripción de los parámetros del modelo de nitrógeno propuesto.
Table 1. Description of the parameters for the proposed nitrogen model.

Variable	Símbolo	Unidad	Valor de referencia
Coefficiente de difusión	D	m^2s^{-1}	$3e-14$
Coefficiente convectivo del agua	v	ms^{-1}	$2,8e-9$
Velocidad máxima de crecimiento de microorganismo	μ_{\max}	s^{-1}	$1,1e-17$
Coefficiente de rendimiento de los microorganismo, (respecto a N)	Y_{xN}	$mg \text{ mg}^{-1}$	$1,1$
Constante de saturación	K_n	$mg \text{ kg}^{-1}$	$15e-3$
Constante de velocidad de mineralización	k_n	$\left(\frac{\text{volumen}}{\text{moles}}\right)^2 \frac{1}{s}$	$7.4e-15$
Profundidad de la matriz	L	m	0.1

primavera y verano, respectivamente, al igual que las condiciones de borde que está dada por:

- 1) $u_i(0, t) = u_{0i}(t) \quad t > 0 \quad \text{con } t \in [0, T]$
 - 2) $v \frac{\partial u_i}{\partial z}(L, t) = K_i \quad t \geq 0 \quad z = L, K_i \text{ una constante}$
- 1) $u_i(0, t) = u_{0i}(t) \quad t > 0 \quad \text{con } t \in [0, T]$
 - 2) $v \frac{\partial u_i}{\partial z}(L, t) = K_i \quad t \geq 0, z = L, K_i \text{ una constante}$

donde la primera establece que entre la profundidad $z=0$ cm y $z=10$ cm, la concentración de cada compuesto está dada por una función: $u_{0i} u_{0i}$, con $i = \{1, 2\}$ y la segunda condición refleja que hay una tasa de cambio constante de la especie en $z=L$, lo cual quiere decir que no hay flujo difusivo a esa profundidad.

El modelo fue ajustado de forma implícita, pues la función objetivo está dada por la diferencia al cuadrado de NT real y NT simulado.

Programas de ajuste de parámetros

Los programas computacionales fueron creados en MATLAB versión 7.8.0 (R2009a) y el cálculo de los parámetros se realizó utilizando métodos de optimización.

El modelo propuesto [Ecuaciones 1, 2, 3] se resolvió usando la función *pdepe* de Matlab, la cual sirve para resolver de forma numérica el sistema de EDP empleando el llamado método de líneas que reduce la EDP a la integración de un número finito de ecuaciones ordinarias, *pdepe* interactúa con BFGS y AG, donde estos últimos minimizan el error entre los datos experimentales y los datos simulados, utilizando mínimos cuadrados.

Las condiciones iniciales y de contorno fueron obtenidas mediante extrapolación de los datos experimentales. Se usó para ello un programa de ajuste polinómico, cuyo código está basado en la función «polyfit» de MATLAB, la cual calcula los coeficientes del polinomio usando mínimos cuadrados.

La descripción completa de los métodos de optimización utilizados se puede encontrar en los libros clásicos especializados (ver Goldberg, 1989; Luenberger, 1984; Nocedal, 1999).

Quasi-Newton (BFGS) es un método iterativo que minimiza una función objetivo $F(x)$ y en cada paso k calcula una dirección conveniente d_k , primero aproximando la matriz Hessiana ${}^2F(x_k)$ en el punto corriente x_k por la matriz definida positiva H_k utilizando la fórmula de Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS) y segundo hallando puntos que hagan decrecer $F(x)$ en la dirección $d_k = -(H_k)^{-1} \tilde{N}F(x_k)$. Este método teóricamente tiene una rápida convergencia a puntos de gradiente nulo $\tilde{N}F(x_k) = 0$, pero se necesitan muchos ajustes numéricos para que el código funcione eficientemente. La convergencia a mínimos locales es inevitable y por ello en la búsqueda

de un mínimo global es necesario correr el programa con varios puntos x_0 iniciales.

AG es un método de búsqueda aleatoria (Goldberg, 1989) en múltiples direcciones y que a través de una función de capacidad selecciona los parámetros que disminuyan el error. Utiliza criterios de evolución eligiendo el mejor conjunto de parámetros encontrado en cada iteración. Se utilizó como un suministrador de muchos mejores puntos iniciales para BFGS.

Ambos métodos fueron implementados en MATLAB. El BFGS está basado en un código FORTRAN original de Shanno (1976) y Buckley (1994) y el AG está basado en un programa FORTRAN diseñado por Carroll (2001). Ambos códigos fueron ajustados y perfeccionados para mejorar su rendimiento en la solución de nuestro problema utilizando en el AG los métodos cruce, selección y mutación recomendados en la literatura (Goldberg, 1989).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La concentración de NT depende de la suma de sus componentes principales (N-NO, N-NH₃ y N-NH₄), (Figs. 1a, 1b, 1c y 1d) muestran los datos simulados versus los datos experimentales (Tablas 2 y 3). Los datos coinciden en un 97% aproximadamente a los datos experimentales de NT (Núñez, 2008), mostrando el ajuste del modelo. Los parámetros se obtuvieron para N-NH₃ y N-NO, utilizando estos mismos datos para simular NT, siendo la estacionalidad uno de los factores que influyó en el comportamiento de los compuestos. Los resultados de Núñez (2008) en campo reportan un efecto de la estación y el modelo refleja dicho efecto.

Rodríguez *et al.* (2003) al referirse al modelo de equilibrio de adsorción, indican que este no fue capaz de reproducir en ningún caso los datos experimentales, debido a la imposibilidad de presentar los procesos de adsorción prácticamente irreversibles en el suelo, en cambio, el modelo descrito por las ecuaciones 1, 2 y 3 con los valores de los parámetros encontrados, se ajustó satisfactoriamente (97%) a los datos experimentales obtenidos.

Marinov *et al.* (2008) proponen un modelo hidráulico que da entradas a un modelo químico que predice el comportamiento de N en el suelo, sin embargo, utilizan parámetros sugeridos en Geng (1988), tales parámetros no tienen necesariamente que describir el comportamiento del nitrógeno en suelos del sur de Chile.

Oliveira (2002) reporta que el modelo exponencial simple propuesto por Jones (1984) es el que mejor describe el proceso de mineralización y el potencial de N or-

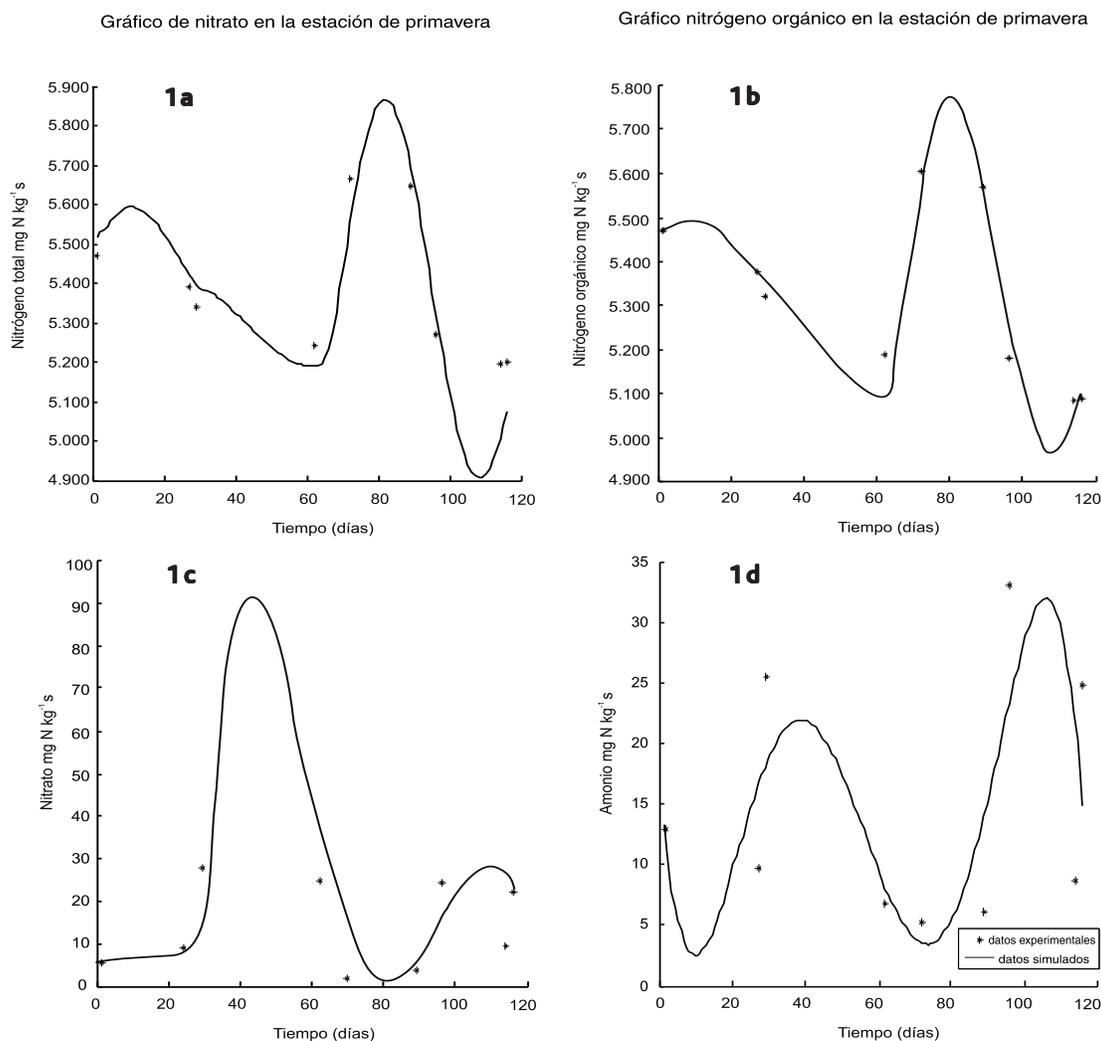


Figura 1. Modelo de ajuste («*» datos reales y «—» datos simulados) de diferentes fracciones de N en suelo volcánicos (mg N kg⁻¹ s) en condiciones de pastoreo con bovinos, Estación Experimental Maquehue, durante la estación primavera 2005: 1a). Nitrógeno total, 1b). Nitrógeno orgánico, 1c). Nitrito disponible y 1d). Amonio disponible.

Figure 1. Adjustment model («*» real data and «—» simulated data) for different fractions of N from volcanic soil (N mg kg⁻¹ s) under bovine grazing conditions, Maquehue Experimental Station, during the spring season of 2005: 1a). Total nitrogen 1b). Organic nitrogen 1c). Nitrate availability and 1d). Ammonium availability.

Tabla 2. Descripción de los parámetros encontrados para el modelo de N orgánico.

Table 2. Description of the parameters found for the organic nitrogen model.

Estación/Parámetro	μ_{Max}	$y_{x/N}$	D	v_1
Primavera	8,56623322	0,38078635	9,0422554	7,02457448
Verano	8,20914594	0,36012424	6,36978651	1,61626092
Otoño	9,95529107	0,13957885	9,95376516	4,89463645
Invierno	9,193102922103	0,613618677043	5,1175707637	1,080796520943

μ_{Max} = velocidad máxima de crecimiento de los microorganismos; $y_{x/N}$ = Coeficiente de rendimiento de los microorganismo, (respecto a N); D = coeficiente de difusión; v_1 = Coeficiente convectivo del agua.

Tabla 3. Descripción de los parámetros encontrados para el modelo de nitrato.
Table 3. Description of the parameters found for the nitrate model.

Estación/Parámetro	D_i	ν	k_n
Primavera	4,24100924	4,28195063	0,00155805
Verano	4,00163825	6,4266640	-0,00112794
Otoño	2,19399123	4,30514363	-0,00708926
Invierno	1,83581311	8,66446066	-0,00285260

D_i = coeficiente de difusión; ν = Coeficiente convectivo del agua; k_n = Constante de velocidad de mineralización.

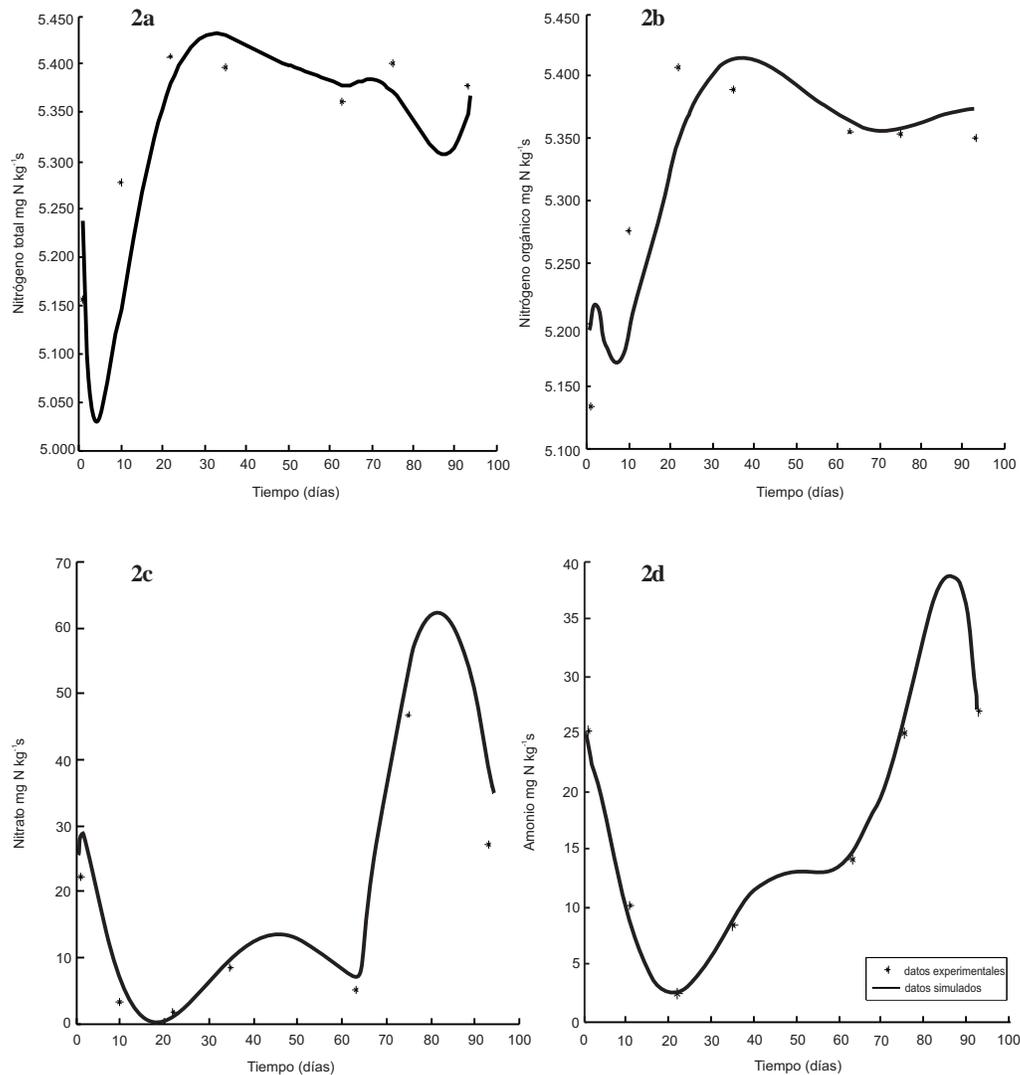


Figura 2. Modelo de ajuste («*» datos reales y «—» datos simulados) de diferentes fracciones de N en suelo volcánicos ($\text{mg N kg}^{-1} \text{ s}$) en condiciones de pastoreo con bovinos, Estación Experimental Maquehue, durante la estación verano 2005-2006: 2a). Nitrógeno total, 2b). Nitrógeno orgánico, 2c). Nitrato disponible y 2d). Amonio disponible.

Figure 2. Adjustment model («*» real data and «—» simulated data) for different fractions of N from volcanic soil ($\text{N mg kg}^{-1} \text{ s}$) under bovine grazing conditions, Maquehue Experimental Station, during the summer season of 2005: 1a). Total nitrogen 1b). Organic nitrogen 1c). Nitrate availability and 1d). Ammonium availability.

gánico que es liberado al medio ambiente y que está disponible para las plantas, pero estas fracciones de N pueden variar dependiendo de la concentración, pH, cantidad usada por las plantas, actividad biológica y procesos de lixiviación y emisiones de gases en la pradera bajo pastoreo (Núñez *et al.*, 2010a; Núñez *et al.*, 2010b).

Peng (2007) utilizó MATLAB como herramienta para calibrar los coeficientes del modelo propuesto, sin embar-

go, la mayoría de los coeficientes usados son seleccionados de referencias publicadas por Charley *et al.* (1980), ya que, la mayoría de las funciones que posee MATLAB para calcular coeficientes, necesitan un punto inicial cerca del óptimo para converger a la solución; es por ello que en este trabajo se utiliza un algoritmo genético con el fin de independizarnos de los resultados obtenidos tanto por Geng (1988) como por Charley *et al.* (1980).

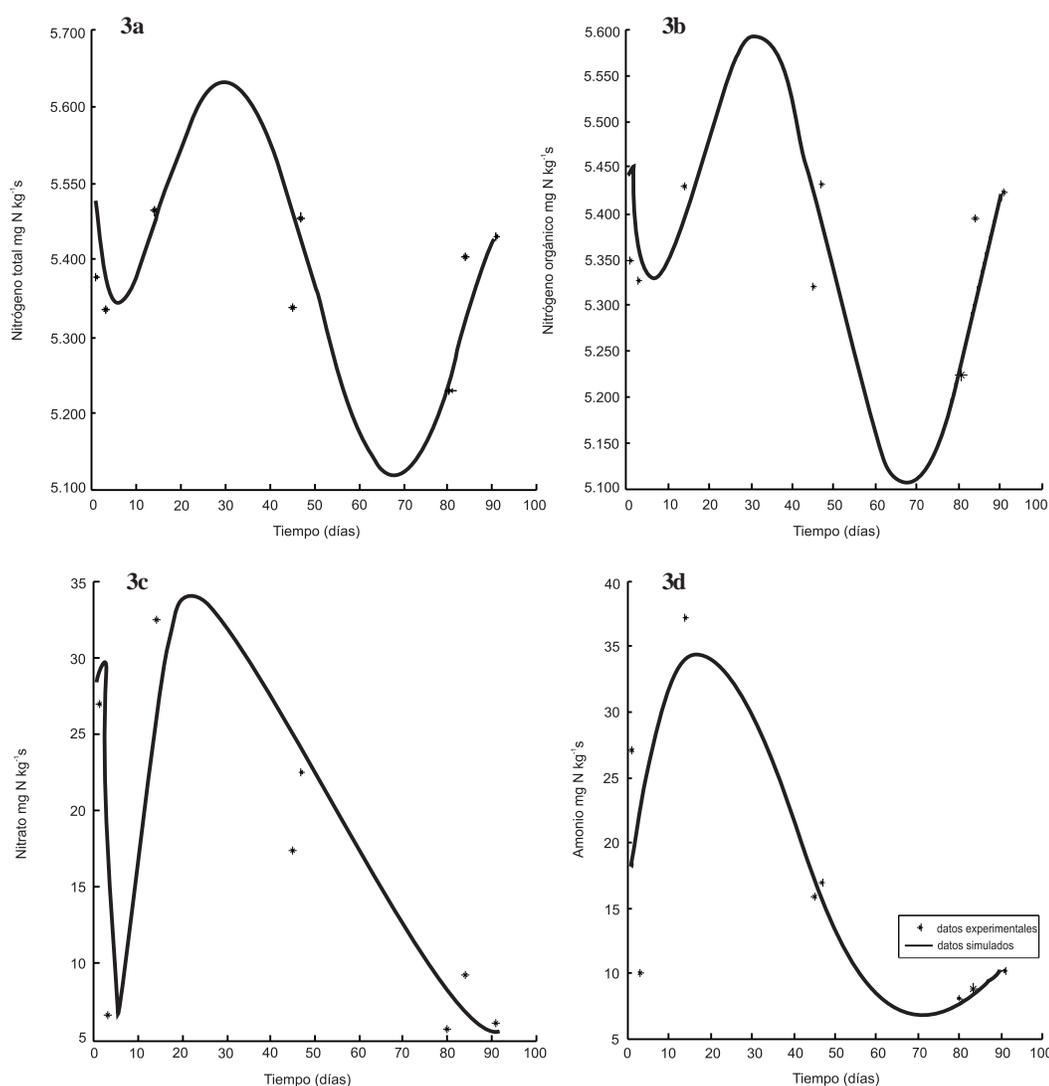


Figura 3. Modelo de ajuste («*» datos reales y «—» datos simulados) de diferentes fracciones de N en suelo volcánicos (mg N kg⁻¹ s) en condiciones de pastoreo con bovinos, Estación Experimental Maquehue, durante la estación otoño 2006: 3a). Nitrógeno total, 3b). Nitrógeno orgánico, 3c). Nitrito disponible y 3d). Amonio disponible.

Figure 3. Adjustment model («*» real data and «—» simulated data) for different fractions of N from volcanic soil (N mg kg⁻¹ s) under bovine grazing conditions, Maquehue Experimental Station, during the autumn season of 2005: 1a). Total nitrogen 1b). Organic nitrogen 1c). Nitrate availability and 1d). Ammonium availability.

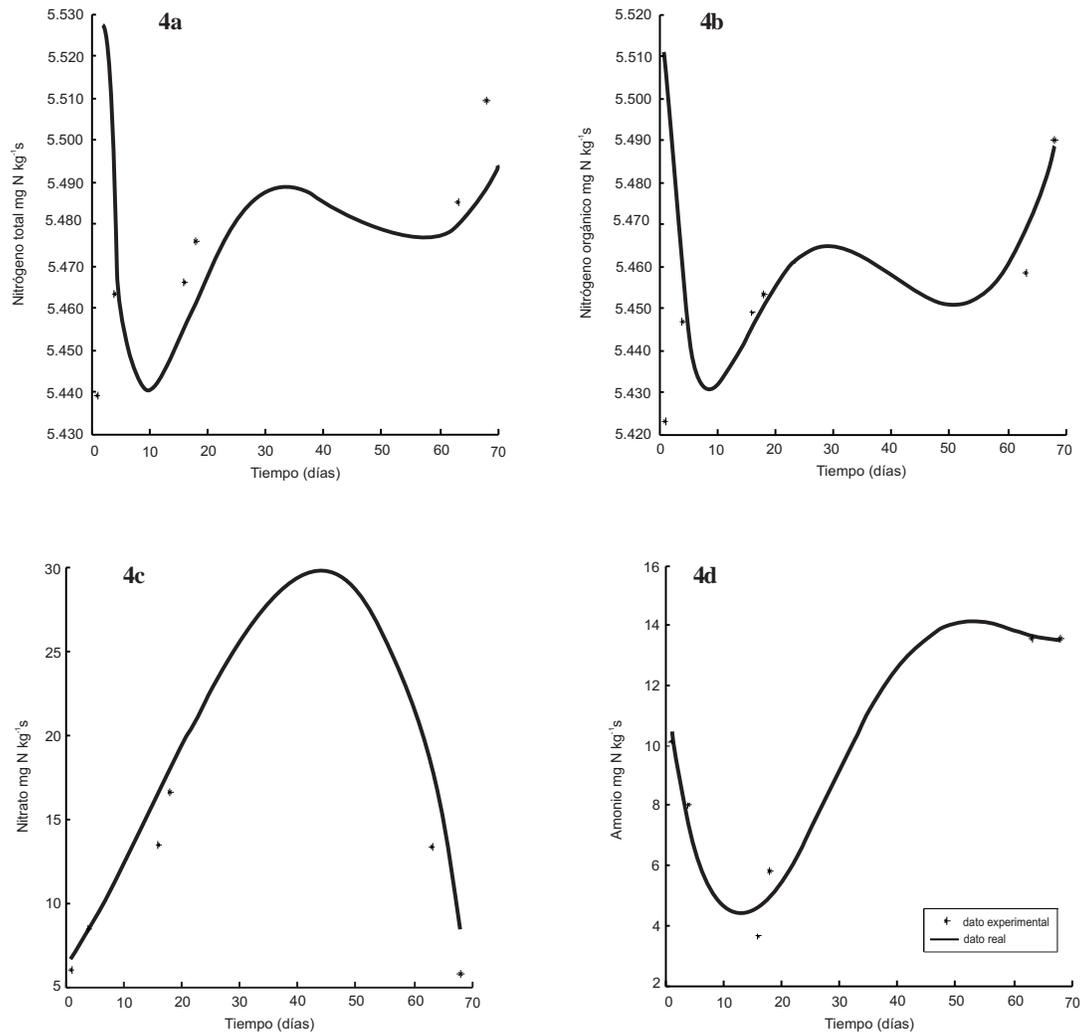


Figura 4. Modelo de ajuste («*» datos reales y «—» datos simulados) de diferentes fracciones de N en suelo volcánicos ($\text{mg N kg}^{-1} \text{s}$) en condiciones de pastoreo con bovinos, Estación Experimental Maquehue, durante la estación invierno 2006: 4a). Nitrógeno total, 4b). Nitrógeno orgánico, 4c). Nitrato disponible y 4d). Amonio disponible.

Figure 4. Adjustment model («*» real dates and «—» simulate dates) of different fractions of N from volcanic soil ($\text{N mg kg}^{-1} \text{s}$) in conditions of grazing bovines, Maquehue Experimental Station, during winter season to 2005: 1a). Total nitrogen 1b). Organic nitrogen 1c). Availability nitrate and 1d). Availability ammonium.

En la obtención de los resultados, se realizaron varios intentos por adaptar las simulaciones a los datos de campo de un año, pero esto arrojaba resultados insatisfactorios, por ello se decidió ajustar los datos por estación, lo cual funcionó en una primera instancia sólo para el N-NO y para N-NH₃, debido a esto se modificó el modelo, quedando planteado en las ecuaciones 1, 2 y 3.

Al considerar el oxígeno constante y la EDP de amonio como un polinomio interpolante, cuyo grado varía según la estación del año, se obtuvo un modelo estacional, el cual presenta menos parámetros que la EDP original lo que disminuye el costo computacional sin pérdida de ajuste a los datos experimentales.

Las condiciones iniciales y de borde fueron replanteadas, pues ahora se requerían por estación; en estas condiciones se obtuvo un buen ajuste, cuyo error relativo entre los datos experimentales y los datos simulados es de aproximadamente 3%, también se obtuvieron diferencias significativas en los parámetros de difusión (D y D_r) según la estación, en tanto los parámetros, se mantuvieron con una pequeña variación. El AG en combinación con BFGS encontraron un mínimo que tenía un error relativo muy satisfactorio, es decir, los métodos de optimización lograron compatibilizar con las funciones de MATLAB.

Los parámetros encontrados describen satisfactoriamente la dinámica de la concentración de N-NT, N-NO y N-NH₃ en las distintas estaciones, logrando una adaptación de los datos reales experimentales en un 97%, porcentaje superior a los obtenidos en los parámetros de referencia (Tabla 1) en el modelo original. Si se comparan las simulaciones realizadas con los parámetros originales, con el ajuste obtenido en este estudio, se observa que el modelo propuesto mejora satisfactoriamente con los parámetros encontrados. La herramienta usada puede ser usada para predecir la dinámica del N con porcentajes altos de predicción en relación a la estación del año y el tipo de animal, en este caso bovinos.

CONCLUSIONES

Los resultados verifican un ajuste de los datos simulados en relación a los datos reales, lo que resalta la bondad del modelo para predecir la dinámica del N en praderas del sur de Chile. Los coeficientes aplicados expresaron la variabilidad de los contenidos de N en relación a los cambios estacionales. Se determinaron los coeficientes para los contenidos de N orgánico (μ_{Max} , $y_{x/N}$, D , v_r) y nitrato (D_r , v_r , k_n) y estos hacen que los valores simulados sean muy similares a los datos experimentales.

Los coeficientes ajustan los contenidos de N al tipo de pastoreo (PI y PS) y la estación del año en un 97%. Esto refleja el potencial de aplicabilidad y uso de estos coeficientes en la estimación de la disponibilidad de estas fracciones de N en el suelo en condiciones de pastoreo en zonas templadas. En base a la simulación de las fracciones de N, se puede dar una rápida recomendación al productor para la fertilización nitrogenada de la pradera; sin necesidad de realizar un análisis de laboratorio. Los parámetros obtenidos para simular los contenidos de N en el suelo, pueden

considerarse los correspondientes al modelo usado para el tipo de suelo en estudio y para la estación de pastoreo durante el año correspondiente.

RECONOCIMIENTOS

Al proyecto FONDEF D0611081 de la Universidad de La Frontera por financiar la investigación. A los proyectos DIUFRO 160603 y FIA-PI-C-2003-1 por facilitar la investigación del Dr. Pedro Núñez.

Al Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales (IDIAF), por permitir la estadía del investigador en Chile. A la Dra. María de la Luz Mora e Ing. Rolando Demanet por su colaboración en la obtención de la base de datos experimentales.

BIBLIOGRAFÍA

- Abbis, C.; JL Robert & LE Parent. 1996. Mechanistic modeling of coupled ammonium and nitrate uptake by onions using the finite element method. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 1160-1167.
- Buckley, AG. 1994. A FORTRAN 90 Code for unconstrained nonlinear minimization. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*.
- Carroll, DL. 2001. Fortran Genetic Algorithm (GA) Driver». Disponible en: <http://www.cuaerospace.com/carroll/ga.html>, (Consultado en julio 2010).
- Charley, RC; DG Hooper & AG Mclee. 1980. Nitrification kinetics in activated sludge at various temperatures and dissolved oxygen concentrations. *Water Res.* 14: 1387-1396.
- CIREN. 2003. Descripciones de suelos, materiales y símbolos, estudio agrológico X Región. Vol. II. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), Santiago, Chile.
- De Willigen, P. 1991. Nitrogen, turnover in soil-crop system; comparison of fourteen simulation model. *Pert. Res.* 27: 141-149.
- Dirección Meteorológica de Chile. 2005-2006. Daily registrations. Maquehue Station, Temuco, Chile.
- Frissel, MJ & JA Van Veen (ed.). 1981. Simulation of nitrogen behavior of soil- plant system. PUDOC, Wageningen, Netherlands.
- Gabrielle B & L Kengni. 1996. Analysis and field-evaluation of CERES model's soil components: Nitrogen transfer and transformations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 142-149.
- Geng, QZ. 1988. Modélisation conjoint du cycle de l'eau et du transfert des nitrates dans un système hydrologique, thesis ENSM de Paris.
- Goldberg, D. 1989. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Addison-Wesley.
- Jones, A. 1984. Estimation of an active fraction of soil nitrogen. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, New York, v.15, p.23-32.
- Jones C & J Kiniry. 1996. CERES-N Maize: A simulation model of maize growth and development. Texas A&M Univ. Press, College Station.

- Luenberger, D. 1984. Introduction to Linear and Nonlinear Programming. Second Edition, Addison-Wesley.
- Marinov, AM & MA Dimiescu. 2008. Experimental research and mathematical modelling of soil and groundwater contamination with nitrogen compounds», department of hydraulics, WIT transactions on Ecology and the Environment.
- Nocedal, J & SJ Wright. 1999. Numerical Optimization. Springer. 192p.
- Núñez, PA; R Demanet; TH Misselbrook; M Alfaro & ML Mora. 2010a. Nitrogen losses under different cattle grazing frequencies and intensities in a volcanic soil of southern Chile. *Chilean J. Agric. Res.* 70: 237-250.
- Núñez, PA; R Demanet; M Alfaro & ML Mora. 2010b. Nitrogen soil budgets in contrasting dairy grazing systems of southern Chile. *Chilean. R.C. Suelo Nutr. Veg.* 10: 170-183.
- Núñez, PA. 2008. Efecto de la frecuencia e intensidad de pastoreo en las pérdidas de nitrógeno en una pradera permanente del Sur de Chile. Tesis de grado para optar al título de Doctor en Ciencias de Recursos Naturales. Universidad de La Frontera. Temuco, Chile. 186p.
- Oliveira, CF; C Gianello; MJ Tedesco; J Riboldi; E Meurer & C Bissani. 2002. Empirical Models to Predict Soil Nitrogen Mineralization. *Ciencia Rural, Santa María* 32(3): 393-399.
- Parton, WJ; WD Gould; FJ Adamsom; S Torbit & RG Woodmansee. 1981. NH_3 volatilization model. In: Frissel MJ & JA. van Veen (eds.) Simulation of nitrogen behavior of soil-plant system. PUDOC, Wageningen, Netherlands. pp. 233-244.
- Peng, JF; BZ Wang; YH Song & P Yuang. 2007. Modeling N transformation and removal in a duckweed pond: Model development and calibration. *Ecol. Model.* 206: 147-152.
- Ritter A. 2002. Optimización de la simulación del transporte de agua y solutos en suelos volcánicos para la evaluación de la contaminación de aguas y suelos por agroquímicos. Tesis doctoral. Universidad de Córdoba.
- Rodríguez, SB; AA Gaité & J Álvarez-Benedí. 2003. Caracterización de procesos acoplados de adsorción, transformación y volatilización de nitrógeno en suelos fertilizados con urea. Estudio de la Zona No Saturada del Suelo Vol. VI. J Álvarez-Benedí y P Marinero.
- Sadzawka, A; ZR Grez; ML Mora; RN Saavedra; MA Carrasco & WC Rojas. 2000. Métodos de análisis recomendados para los suelos chilenos. Comisión de Normalización y Acreditación (CNA), Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo, Chile. Disponible en: <http://alerce.inia.cl/docs/presentaciones/Doc002ASR.pdf>, (Consultado en agosto 2007).
- Sadzawka, A; ZR Grez; ML Mora; RN Saavedra & MA Carrasco. 2001. Métodos de análisis de tejidos vegetales. Comisión de Normalización y Acreditación (CNA), Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo, Chile. Disponible en: <http://alerce.inia.cl/docs/presentaciones/Doc001ASR.pdf>, (Consultado en agosto 2007).
- Schmied B; K Abbaspour & R Schulin. 2000. Inverse Estimation of Parameters in a Nitrogen Model Using Field Data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 533-542.
- Shanno, DF & KH Phua. 1978. Minimization of Unconstrained Multivariate Function. ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS).