

## EVALUACIÓN DE LA RECOMENDACIÓN DE FERTILIZACIÓN NITROGENADA PARA CULTIVOS ANUALES EN SUELOS DE ORIGEN VOLCÁNICO USANDO UN MODELO DE SIMULACIÓN<sup>1</sup>

Evaluation of nitrogen-fertilizer recommendation for annual crops in soils of volcanic origin using a simulation model<sup>1</sup>

Erick Zagal V.<sup>2\*</sup>, Juan Hirzel C.<sup>3</sup> e Iván Vidal P.<sup>2</sup>

### ABSTRACT

Fertilizer recommendation systems used to optimize nitrogen fertilization can be divided into three groups: systems based principally on soil analysis, systems based on plant analysis, and systems based on simulation models. One of the available models that describes N flows in plant and soil systems applicable to agricultural ecosystems is the "Rothamsted Model" (Rothamsted Nitrogen Turnover Model). This experiment used the SUNDIAL model, a PC-based version of the Rothamsted Model, to evaluate N-fertilization recommendations made by the technological transfer groups (GTTs) of Mulchén (37°42' S lat and 72°14' W long) and of El Carmen (36°51' S lat and 72°01' W long), considering the respective agricultural management systems. Nitrate leaching estimates were also determined for normal rainfall conditions. The results obtained indicate that the SUNDIAL model is sensitive to the agricultural management performed in foothill conditions for the crop rotations considered. Nitrogen dose rates and fertilization strategy used by the farmers coincide to those calculated by the model, showing acceptable yields and moderate nitrogen losses. The usefulness of the SUNDIAL computational model as a tool to generate nitrogen fertilization recommendations is discussed.

**Key words:** crop rotation, nitrogen turnover, SUNDIAL model.

### RESUMEN

Los sistemas de recomendaciones para optimizar la fertilización nitrogenada se pueden dividir en tres grupos: sistemas basados principalmente en análisis de suelos, sistemas basados en análisis de plantas, y sistemas basados en modelos de simulación. Dentro de los modelos existentes que describen el flujo de N en un sistema planta y suelo aplicables a ecosistemas agrícolas, se encuentra el modelo Rothamsted (Rothamsted Nitrogen Turnover Model). En este trabajo se utilizó el modelo SUNDIAL, versión computacional del modelo Rothamsted, para evaluar las recomendaciones de fertilización nitrogenada realizadas por los grupos de transferencia tecnológica (GTTs) de las localidades de Mulchén (37°42' lat. Sur y 72°14' long. Oeste) y el Carmen (36°51' lat. Sur y 72°01' long. Oeste), considerando los manejos agronómicos respectivos. Se incluyeron, además, estimaciones de lixiviación de nitratos para las condiciones de pluviometría de la zona. Los resultados obtenidos indican que el modelo SUNDIAL es sensible a los manejos agronómicos realizados en condiciones de precordillera para la rotación de cultivos considerada. Las dosis de N y la estrategia de fertilización nitrogenada usadas por los agricultores en los casos de estudio (Mulchén y El Carmen), coinciden con las calculadas a través del modelo, logrando rendimientos aceptables y pérdidas de N moderadas. Se analiza la utilidad del modelo computacional SUNDIAL como herramienta para generar recomendaciones de fertilización nitrogenada.

**Palabras clave:** rotación de cultivos, ciclaje de nitrógeno, modelo SUNDIAL.

---

<sup>1</sup> Recepción de originales: 10 de abril de 2001.

<sup>2</sup> Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía, Casilla 537, Chillán, Chile. E-mail: [ezagal@udec.cl](mailto:ezagal@udec.cl)

\* Autor para correspondencia.

<sup>3</sup> Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Quilamapu, Casilla 426, Chillán, Chile. E-mail: [jhirzel@quilamapu.inia.cl](mailto:jhirzel@quilamapu.inia.cl)

## INTRODUCCIÓN

En un sistema de agricultura sustentable, la aplicación de dosis adecuadas de N está dirigida a conseguir un alto retorno económico a través de un rendimiento óptimo y de calidad, pero también es importante minimizar los riesgos de contaminación de aguas superficiales o profundas por lixiviación de nitratos, y de la atmósfera, con gases derivados de procesos como desnitrificación ( $N_xO$ ,  $N_2$ ) y volatilización ( $NH_3$ ).

Los sistemas de recomendaciones para optimizar la fertilización nitrogenada se pueden dividir en tres grupos: sistemas basados principalmente en análisis de suelos, sistemas basados en análisis de plantas, y sistemas basados en modelos de simulación (Geypens y Vandendriessche, 1996). Las primeras recomendaciones, basadas en el contenido de N mineral del suelo al comienzo de la estación de crecimiento, surgieron en la década de los setenta (Wehrmann y Scharpf, 1979). A partir de entonces, diversas ecuaciones para determinar dosis de N han sido desarrolladas (Geypens y Vandendriessche, 1996). En general, la aplicación de métodos basados en análisis de suelos requiere el conocimiento e integración de factores como: fecha del análisis de suelo, profundidad radicular, demanda total de N del cultivo según rendimiento esperado, mineralización y lixiviación de N en el período de crecimiento, eficiencia de la fertilización. Un ejemplo de lo anterior corresponde al “método racional”, desarrollado por Rodríguez (1993) en Chile, que además puede utilizarse en los cálculos de fertilización con otros nutrientes. Este método no utiliza análisis de suelo para el cálculo de fertilización nitrogenada, pero el suministro de N del suelo se deduce a partir del conocimiento del aporte de N de los residuos de cosecha y la fertilización aplicada en el cultivo anterior.

Una alternativa a los sistemas mencionados, que se utiliza para la predicción de los requerimientos de N de un cultivo en condiciones edafoclimáticas específicas, es el uso de modelos computacionales. La simulación es una técnica que estudia el comportamiento de sistemas reales sobre la base de modelos. Estos últimos son descripciones simplificadas que incluyen aspectos esenciales de los sistemas existentes, o de aquellos que van a ser construidos, los cuales se basan en grupos ordenados de hipótesis (Silva y Mansilla, 1993). Para efectos prácticos, modelos construidos para efectuar recomendaciones de fertilización nitrogenada sólo debieran necesitar un “set” mínimo de datos de ingreso fácilmente disponibles.

Dentro de los modelos existentes, que describen el flujo de N en un sistema planta y suelo aplicables a ecosistemas agrícolas, se encuentra el modelo Rothamsted (Rothamsted Nitrogen Turnover Model) (Bradbury *et al.*, 1993), desarrollado en la estación experimental que lleva el mismo nombre en Inglaterra. Este modelo describe las transformaciones del N en un sistema suelo-cultivo, a través de una serie de ecuaciones de cero y primer orden para procesos como la absorción de N por el cultivo, mineralización-inmovilización de la materia orgánica, y ganancias y pérdidas de N dentro del sistema.

El modelo Rothamsted cuenta con una versión-PC llamada SUNDIAL (Simulation of Nitrogen Dynamics In Arable Land), amigable al usuario. Esta versión PC opera con un sistema-menú que permite escoger respuestas, o instruye sobre la naturaleza exacta de la información (input) requerida a ingresar (Smith *et al.*, 1996), y es fácil de ejecutar.

El objetivo de este trabajo fue: a) el estudio y ejecución del modelo SUNDIAL para evaluar su utilidad como herramienta en la verificación de estrategias de fertilización nitrogenada actualmente en uso en dos rotaciones de cultivos que se realizan en condiciones de precordillera de la VIII Región de Chile; b) estimar a través del modelo las pérdidas por lixiviación en las condiciones de pluviometría de la zona; y c) utilizar SUNDIAL para incrementar el grado de entendimiento de la dinámica del N (flujos entre distintos compartimentos) en las rotaciones analizadas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**El modelo.** El modelo SUNDIAL utilizado corresponde a una versión DOS. Este es un programa completamente compilado escrito en lenguaje Turbo-C<sup>++</sup> y Fortran-77, diseñado para operar en un computador personal IBM-compatible, cuyos requerimientos mínimos han sido descritos en publicaciones anteriores (v.g., 386 + coprocesador matemático; monitor gráfico CGA, EGA ó VGA, espacio total de disco requerido inferior a 1.44 Mbytes) (Smith *et al.*, 1996). El modelo incluye 14 compartimentos, de los cuales tres son ingresos (inputs) de N (N atmosférico, N-fertilizantes y N-orgánico en estiércoles), cuatro compartimentos son salidas (outputs) de N del sistema (N-desnitrificado, N-lixiviado, N-cosechado y N-volatilizado por senescencia), y siete compartimentos son de transformaciones en los cuales el flujo de N ingresa o sale (N-amonio, N-nitrato, N-biomasa microbiana, N-humus del suelo, N en cultivo, N en residuos, y que distingue además N en la caña del rastrojo) (Bradbury *et al.*, 1993; Smith *et al.*, 1996). Transformaciones del N en el modelo, derivadas de procesos de descomposición de material orgánico, son dependientes de la descomposición de C orgánico, el cual es simulado según el modelo de tres compartimentos (biomasa, humus y CO<sub>2</sub>) descrito por Jenkinson y Parry (1989).

Para su ejecución SUNDIAL solicita como mínimo lo siguiente: antecedentes de suelo (textura y profundidad); antecedentes de tiempo atmosférico (datos semanales de precipitación, evaporación y temperatura media del aire, para un período de tiempo cronológico representativo); antecedentes de manejo de residuos de cultivo previo a la rotación que será simulada; antecedentes de existencia de praderas previo a la rotación; antecedentes de rotación de cultivo, rendimientos logrados, manejo agronómico y de residuos, enfatizando el último cultivo de la rotación que será el verificado por SUNDIAL; fertilización nitrogenada realizada durante la rotación (dosis por cultivo, número y fecha de parcializaciones de N, cantidad de N aplicado en cada parcialización, fuente de N usada); fecha de saturación hídrica del suelo (fijada según hemisferio).

**Datos meteorológicos.** Se ingresaron datos meteorológicos semanales de temperatura, precipitación y evaporación de la estación meteorológica de la Universidad de Concepción en Chillán (36°34' lat. Sur y 72°06' long. Oeste), correspondientes al año 1999 (Boletín Agrometeorológico, 1999), considerado como año normal por su similitud con el promedio de 30 años (Universidad de Concepción, 2000). Registros de datos de esta naturaleza no existen en las localidades usadas en este estudio. Para cumplir con las exigencias del modelo, los datos fueron ingresados en escala semanal con formato de hoja de cálculo, y ordenados según lo sugerido por SUNDIAL en su archivo demostrativo para datos de tiempo atmosférico: "sample.met". Los valores anuales para estos datos corresponden a 1.085 mm de precipitación, 1.438,6 mm de evaporación, y 13,87°C de temperatura media.

**Parámetros ingresados para la simulación.** Para ejecutar la simulación que determina la estrategia de fertilización nitrogenada a realizar en el último cultivo de cada rotación, se ingresaron según requerimientos de SUNDIAL, antecedentes generales de suelo, clima, manejo agronómico, rotación de cultivos y estrategia de fertilización nitrogenada realizados por los Grupos de Transferencia Tecnológica (GTTs) de las localidades de Mulchén (37°42' lat. Sur y 72°14' long. Oeste) y el Carmen (36°51' lat. Sur y 72°01' long. Oeste). Los parámetros de suelo, clima y cultivo anterior tanto para la localidad de Mulchén como la del Carmen se muestran en el **Cuadro 1**. La rotación de cultivos y fertilización nitrogenada para las localidades de Mulchén y El Carmen se muestran en los **Cuadros 2 y 3**, respectivamente. La fertilización nitrogenada para cada cultivo en la rotación usada por los agricultores es producto de análisis de suelo, experimentos regionales y cálculos realizados usando el "método racional", desarrollado por Rodríguez (1993) en Chile.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo Rothamsted ha sido descrito, ajustado (determinación de mejores valores para sus constantes y parámetros) y evaluado (validado) utilizando datos de experimentos con  $^{15}\text{N}$  en cultivos anuales, principalmente trigo (*Triticum aestivum* L.) y para condiciones de clima temperado (Bradbury *et al.*, 1993). La fortaleza del modelo está en su habilidad para transferir el N de un año al otro, es decir, la simulación de un año proporciona el 'input' para el próximo y así sucesivamente. El propósito del modelo a largo plazo es predecir cuánto N puede estar disponible para un determinado cultivo durante su estación de crecimiento, a partir de un conocimiento del suelo, su historia de cultivos y antecedentes de clima local. Esta información puede, a su vez, ser usada para especificar cuanto fertilizante nitrogenado aplicar (recomendación) a un determinado cultivo, tipo de suelo, y cuándo aplicarlo, sin la necesidad de estimaciones de N mineral del suelo.

**Cuadro 1.** *Parámetros de suelo, clima y cultivo o especie anterior ingresados al modelo SUNDIAL en las localidades de Mulchén y El Carmen.*

**Table 1.** *Soil, climate and crop or previous crop parameters entered into SUNDIAL's model for Mulchén and El Carmen locations.*

Parámetro considerado		Mulchén	El Carmen
Suelo	<b>Profundidad</b>	150 cm	100 cm
	Textura	Arcillosa	Franco limoso
	Drenaje	Moderado	Bueno
	Deposición de N anual en la lluvia	15 kg ha <sup>-1</sup>	15 kg ha <sup>-1</sup>
Clima	Estación Agroclimática	Chillán (año 1999)	Chillán (año 1999)
	Fecha de saturación hídrica de suelos	10 de junio (hemisferio sur)	10 de junio (hemisferio sur)
Cultivo o especie anterior	Especie	Pradera natural	Trigo
	Rendimiento	1 t ha <sup>-1</sup>	5 t ha <sup>-1</sup>
	Incorporación de residuos	Sí	No

**Cuadro 2. Rotación de cultivos y manejo de la fertilización nitrogenada realizada por el grupo de transferencia tecnológica (GTT) de la localidad de Mulchén.**

**Table 2. Crop rotation and nitrogen-fertilization management performed by the technological transfer group (GTT) in the Mulchén location.**

Cultivo	Año	Rendim. (t ha <sup>-1</sup> )	Fecha de siembra	Fecha de cosecha	Fertilización nitrogenada		
					Dosis (kg ha <sup>-1</sup> )	Fecha de aplicación	Fuente de N
Avena de invierno <sup>1</sup>	1995	4	13/5/95	14/12/95	80	13/5/95	Urea
Pradera natural <sup>1</sup>	1996	1	No hay	15/1/97	0		
Trigo de invierno	1997	5	13/5/97	15/1/98	30	13/5/97	FMA <sup>2</sup>
					70	10/6/97	Urea
					70	15/7/97	Urea
					Total=170		
Trigo de invierno <sup>1</sup>	1998	5	13/5/98	15/1/99	30	13/5/98	FDA <sup>3</sup>
					45	15/7/98	Urea
					66	9/9/98	Urea
					Total=141		
Raps de invierno	1999	3	13/5/99	9/12/99	50	13/5/99	Urea
					50	15/7/99	Urea
					50	25/8/99	Urea
					Total=150		

<sup>1</sup> Incorporación de residuos. En el caso de la pradera natural la cosecha significa un corte con posterior incorporación de los residuos

<sup>2</sup> Fosfato mono-amónico

<sup>3</sup> Fosfato di-amónico

**Cuadro 3. Rotación de cultivos y manejo de la fertilización nitrogenada realizada por el grupo de transferencia tecnológica (GTT) de la localidad de El Carmen.**

**Table 3. Crop rotation and nitrogen-fertilization management performed by the technological transfer group (GTT) in the El Carmen location.**

Cultivo	Año	Rendim. (t ha <sup>-1</sup> )	Fecha de siembra	Fecha de cosecha	Fertilización nitrogenada		
					Dosis (kg ha <sup>-1</sup> )	Fecha de aplicación	Fuente de N
Trigo de invierno	1995	4,5	13/5/95	15/1/96	30	13/5/95	FMA <sup>1</sup>
					60	29/7/95	Urea
					60	9/9/95	Urea
					Total=150		
Avena de invierno	1996	4,8	13/5/96	15/12/96	30	13/5/96	FMA
					70	12/8/96	Urea
					Total=100		
Trigo de invierno	1997	5,7	13/5/97	15/1/98	30	13/5/97	FMA
					60	29/7/97	Urea
					60	9/9/97	Urea
					Total=150		
Avena de invierno	1998	5,1	13/5/98	15/12/98	30	13/5/98	FMA
					90	12/8/98	Urea
					Total=120		
Trigo de invierno	1999	6,0	13/5/99	16/12/99	30	13/5/99	FMA
					60	29/7/99	Urea
					70	9/9/99	Urea
					Total=160		

<sup>1</sup> FMA: Fosfato monoamónico.

La utilización de SUNDIAL permite, por lo tanto, verificar la estrategia de fertilización nitrogenada a realizar en el último cultivo de la rotación considerada (cultivo actual y de nuestro interés), de lo cual se pueden obtener dos resultados: 1) que la estrategia de fertilización nitrogenada a realizar ingresada al modelo sea aceptada por éste, para lo cual se deduciría que, tanto la cantidad de N a usar como el número y oportunidad de parcializaciones a realizar, son adecuadas para lograr la obtención del rendimiento propuesto y a la vez generar pérdidas moderadas de N; y 2) que la estrategia de fertilización de N a usar sea inadecuada, frente a la cual SUNDIAL propone una nueva estrategia, en términos de cantidad de N, oportunidad y número de parcializaciones a realizar.

**Simulaciones efectuadas por SUNDIAL.** El estudio y ejecución de SUNDIAL necesitó de muchos experimentos simulados previos, usando distintas condiciones de manejo agronómico propios de la región, antes de lograr su correcta aplicación (datos no mostrados). Precisamente, la fortaleza de los modelos y técnicas de simulación está en la oportunidad de poder ejecutar experimentos simulados y predecir el comportamiento, en este caso, de aplicaciones de N en el sistema suelo-planta escogidos.

La simulación ejecutada por el modelo para las condiciones de los GTTs de Mulchén y El Carmen, coincidió con la estrategia de fertilización nitrogenada realizada por estos grupos de agricultores para el último cultivo de cada rotación. Así, en ambas situaciones, SUNDIAL no sugirió una estrategia distinta (**Cuadros 4 y 5**; primera fila, información N del fertilizante). Los **Cuadros 4 y 5** muestran además una comparación de los ingresos (inputs), salidas (outputs) y transformaciones de N para las rotaciones de cultivos realizadas en Mulchén y El Carmen, respectivamente.

**Localidad de Mulchén:** Las diferencias obtenidas en el tamaño de entradas (inputs), salidas (outputs) y transformaciones del N entre cada cultivo, reflejan la dinámica del N en el sistema suelo-planta en función del manejo realizado en cada situación (**Cuadro 4**). Por ejemplo, al examinar los procesos de mineralización-inmovilización (ciclo interno del N) se observa que el proceso de mineralización es el dominante. Esta característica es especialmente relevante para los cultivos de avena (*Avena sativa* L.) y raps (*Brassicca napus* L.) puesto que las cantidades de N inmovilizadas determinadas por el modelo aparecen muy bajas. Por otro lado, el modelo determina cantidades de N inmovilizadas importantes para la pradera natural y los dos cultivos de trigo. Estos resultados se explicarían, al menos parcialmente, por la incorporación de residuos de la cosecha anterior (ver **Cuadro 2**). Para el funcionamiento de SUNDIAL en cuanto a transformaciones del N, ciertas prioridades han sido especificadas. Éstas son, para amonio: inmovilización > nitrificación > absorción de N por la planta; y para nitrato: inmovilización > desnitrificación > absorción de N por la planta > lixiviación (Bradbury *et al.*, 1993). De allí, entonces, que el incremento de procesos de inmovilización signifiquen una disminución de procesos como nitrificación, desnitrificación y lixiviación (**Cuadro 4**).

**Cuadro 4. Comparación de ingresos (inputs), salidas (outputs) y transformaciones de N en una rotación de cultivos característica de la zona de Mulchén frente a condiciones de pluviometría normal, según las simulaciones realizadas por el programa SUNDIAL.**

**Table 4. Comparison of inputs, outputs and N transformations in a characteristic crop rotation in the Mulchén location, under normal precipitation conditions, according to simulations performed by the SUNDIAL model.**

Input, output o transformación de nitrógeno	Cultivo de avena	Pradera natural	Cultivo de trigo	Cultivo de trigo	Cultivo de raps
	(kg ha <sup>-1</sup> )	(kg ha <sup>-1</sup> )	(kg ha <sup>-1</sup> )	(kg ha <sup>-1</sup> )	(kg ha <sup>-1</sup> )
N del fertilizante <sup>1</sup>	80	1	170	141	150
N cosechado <sup>2</sup>	64	5	89	89	121
Absorción de NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> <sup>3</sup>	4	0	40	40	14
Absorción de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> <sup>3</sup>	127	15	121	122	226
Mineralización bruta <sup>3</sup>	148	177	150	158	148
Inmovilización bruta <sup>3</sup>	3	59	65	65	1
Nitrificación <sup>3</sup>	208	117	194	178	260
Denitrificación <sup>2</sup>	32	44	23	27	29
Lixiviación <sup>2</sup>	24	65	41	33	20
Volatilización de NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> <sup>2</sup>	15	0	25	21	33
Volatilización de N por el cultivo <sup>2</sup>	4	0	5	5	1
Deposición de N <sup>1</sup>	14	16	15	15	14
N desde semilla <sup>1</sup>	4	4	4	4	0
N en residuos <sup>3</sup>	69	13	72	72	118

<sup>1</sup> Ingreso de N

<sup>2</sup> Salida de N.

<sup>3</sup> Transformación de N

**Cuadro 5.** Comparación ingresos (inputs), salidas (outputs) y transformaciones de nitrógeno en una rotación de cultivos característica de la zona de El Carmen frente a condiciones de pluviometría normal, según las simulaciones realizadas por el programa SUNDIAL.

**Table 5.** Comparison of inputs, outputs and N transformations in a characteristic crop rotation in the El Carmen location, under normal precipitation conditions, according to simulations performed by the SUNDIAL model.

Input, output o transformación de nitrógeno	Cultivo de trigo	Cultivo de avena	Cultivo de trigo	Cultivo de avena	Cultivo de trigo
	(kg ha <sup>-1</sup> )	(kg ha <sup>-1</sup> )	(kg ha <sup>-1</sup> )	(kg ha <sup>-1</sup> )	(kg ha <sup>-1</sup> )
N del fertilizante <sup>1</sup>	150	100	150	120	160
N cosechado <sup>2</sup>	78	80	99	87	97
Absorción de NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> <sup>3</sup>	23	15	32	17	33
Absorción de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> <sup>3</sup>	126	137	138	144	137
Mineralización bruta <sup>3</sup>	151	118	151	119	140
Inmovilización bruta <sup>3</sup>	64	1	65	1	62
Nitrificación <sup>3</sup>	214	203	203	221	204
Denitrificación <sup>2</sup>	29	25	25	22	27
Lixiviación <sup>2</sup>	25	69	32	57	35
Volatilización de NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> <sup>2</sup>	3	2	0	2	0
Volatilización de N por el cultivo <sup>2</sup>	4	3	0	3	0
Deposición de N <sup>1</sup>	16	14	16	14	15
N desde semilla <sup>1</sup>	4	4	4	4	4
N en residuos <sup>3</sup>	70	74	75	76	77

<sup>1</sup> Ingreso de N

<sup>2</sup> Salida de N.

<sup>3</sup> Transformación de N.

De lo anterior se desprende que el cultivo considerado en la rotación tiene un efecto importante en algunas transformaciones de N ocurridas durante cada ciclo específico. Así, en relación a la dosis de fertilización nitrogenada, los cultivos de raps y avena muestran una absorción mayor de N que el cultivo de trigo, especialmente a la forma de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Aparentemente, la mayor eficiencia en el uso del N de los primeros es producto tanto de una competencia efectiva por el nutriente de las raíces con respecto a los microorganismos del suelo, así como de una mayor disponibilidad de N nativo. Por otro lado, estudios realizados en trigo de invierno y aplicación de urea como fertilización nitrogenada han demostrado que la inmovilización de N por la microflora del suelo es un factor de gran competencia en el proceso de absorción del nutriente por las plantas (Recous *et al.*, 1988). Sin embargo, estos autores reportan cantidades inmovilizadas un poco menores a las determinadas por SUNDIAL en nuestras condiciones. En el **Cuadro 4** se observa que en el cultivo de trigo, la cantidad de N ingresado (fertilizante y mineralización del suelo) supera la absorción, aumentando la cantidad de N susceptible a ser inmovilizado. Al respecto, investigaciones reportadas por otros autores señalaron un rango de inmovilización del fertilizante nitrogenado (urea o nitrato de amonio) entre 16 – 40 kg N ha<sup>-1</sup>, el cual puede incrementarse en 7 – 15 kg ha<sup>-1</sup> cuando se incorporan los residuos de cosecha (Myers y Paul, 1971; Recous *et al.*, 1988).

La alta mineralización bruta observada durante el ciclo de la pradera natural sugiere un incremento en la disponibilidad de C y energía, como consecuencia de un suministro importante de sustratos orgánicos para



los microorganismos heterótrofos, a la forma de raíces, exudados y biomasa vegetal propio de las praderas (Whipps y Lynch, 1990). Al mismo tiempo, condiciones limitantes en N, pueden resultar en una mayor localización de éste en las raíces (Lambers, 1983). Otro efecto del cultivo se observa en las distintas cantidades determinadas por el modelo en el compartimento de N presente (contenido) en los residuos.

Dentro de las simulaciones obtenidas con el modelo, se destaca la existencia de parámetros de escasa variación para cada cultivo en particular, por ejemplo, en el cultivo de trigo la volatilización de amonio desde el suelo en cada simulación es similar ( $4 \text{ kg N ha}^{-1}$ ). De igual forma, la volatilización de N desde estructuras senescentes de este cultivo tampoco varía frente a niveles suficientes de fertilización, siendo igual a  $5 \text{ kg N ha}^{-1}$ . Este tipo de resultado está relacionado con ciertas condiciones establecidas al construir el modelo y que se basan en estudios y resultados experimentales reportados en la literatura. Así por ejemplo, la volatilización de  $\text{NH}_3$  desde el suelo sólo ocurre en la semana de aplicación del fertilizante amoniacal si la precipitación es  $< 5 \text{ mm}$  (Bradbury *et al.*, 1993). En el caso de volatilización desde el cultivo durante su período de senescencia (5 semanas antes de la cosecha), ocurre sólo si el contenido de N de la parte aérea es mayor que el contenido de N en el grano más aquel existente en toda la paja (Bradbury *et al.*, 1993).

**Localidad de El Carmen:** De acuerdo a la estimación del modelo, los cultivos de avena y trigo absorben mayores cantidades de nitratos que amonio como fuente de N.

La inmovilización de N determinada por el modelo en el cultivo de avena no fue superior a  $1 \text{ kg ha}^{-1}$ , sugiriendo una competencia favorable de este cultivo por la absorción de N con los microorganismos del suelo, lo cual que podría explicarse por el sistema radicular que la avena presenta. Al respecto, Broadbent (1984) señaló que la absorción de N desde el suelo (suministro) por el cultivo de avena fertilizado con  $90 \text{ kg N ha}^{-1}$  fluctuó entre 46-61% del N total absorbido, en cambio, el cultivo de trigo fertilizado con  $50\text{-}100 \text{ kg N ha}^{-1}$  (Olson *et al.*, 1979) extrajo desde el suelo entre 56-79% del N total absorbido. Lo anterior indicaría que la avena manifiesta un mayor potencial de recuperación del fertilizante nitrogenado, lo cual disminuiría la inmovilización del N derivado del fertilizante. En trigo de invierno, la eficiencia del uso del fertilizante nitrogenado, aplicado en otoño, ha sido reportada en el rango de 11 a 42% para distintos tipos de suelos (Powlson *et al.*, 1986a), siendo el valor más alto para un suelo más pesado y con drenaje regular. Sin embargo, otros estudios muestran para el trigo de invierno (con aplicación de N en primavera) una mayor recuperación promedio del N por la planta a la cosecha; por ejemplo, de 51-68% (Powlson *et al.*, 1986b, 1992), 50% (Recous *et al.*, 1988b), 52% (MacDonald *et al.*, 1997).

Los estudios anteriores demuestran que la recuperación del N por el cultivo se ve afectada por factores como el tiempo de aplicación, tipo de suelo, cultivo anterior y/o historial de cultivos y dosis de fertilizantes entre otros. Lo encontrado por el modelo concuerda parcialmente con esta información, puesto que en nuestras condiciones las cantidades aplicadas en avena son menores que en trigo ( $100$  y  $150\text{-}160 \text{ kg ha}^{-1}$ , respectivamente) y además, aproximadamente  $90 \text{ kg}$  de la cantidad total se aplican entre mayo y julio (otoño, invierno) en el caso del trigo, y sólo  $30 \text{ kg}$  en el caso de la avena (mayo). Las cantidades restantes se suelen aplicar en los meses de agosto (avena) y septiembre (trigo) (**Cuadro 3**), período con menos intensidad de lluvias y temperaturas en alza.

Las pérdidas por lixiviación son mayores durante el cultivo de avena, lo que puede resultar, por una parte, de la menor inmovilización de N presentada durante este cultivo, y por otra, de la menor absorción de N con respecto al cultivo de trigo (**Cuadro 5**). El modelo determina un ciclo interno del N durante el cultivo de trigo más intenso que en el caso de la avena, sugiriendo un aumento de la mineralización del N nativo en el primero, efecto que podría estar asociado a una mayor cantidad de N aplicado. Sin embargo, y de acuerdo a lo determinado por el modelo, la diferencia encontrada entre los dos procesos no resultaría en una mayor disponibilidad de N para el cultivo (**Cuadro 5**).

**Estimación de las pérdidas de N ocurridas por lixiviación frente a condiciones de pluviometría normal.** Las simulaciones realizadas por SUNDIAL para las rotaciones de cultivos consideradas en las localidades de Mulchén y el Carmen, indican a través de diagramas de flujo el valor de las diferentes entradas, salidas y transformaciones de N durante cada ciclo de cultivo, para la profundidad de suelo indicada en el ingreso de datos de cada simulación. Los resultados de estos diagramas de flujo fueron utilizados para construir los **Cuadros 4 y 5** (localidades de Mulchén y El Carmen, respectivamente), en los cuales se señalan, entre otras, las pérdidas de N ocurridas por lixiviación en cada ciclo de cultivo y en cada rotación. Los antecedentes de los **Cuadros 4 y 5** permiten estimar una lixiviación promedio de 36,6 kg N ha<sup>-1</sup> en todo el período de rotación de cultivos considerada en la localidad de Mulchén, y de 43,6 kg N ha<sup>-1</sup> para la rotación de cultivos en la localidad de El Carmen, respectivamente. Esto representa 33,8 y 32,1% de lixiviación del N fertilizante en las localidades respectivas, considerando una profundidad de enraizamiento de 100 cm. Estudios en la zona sur (IX y X Región), para iguales condiciones de profundidad, muestran riesgos de lixiviación en un rango de 3 – 31% para dosis de fertilización de 150 kg N ha<sup>-1</sup> aplicados en forma parcelizada (Pinochet, D., 1991; Universidad Austral de Chile, datos no publicados).

**Limitaciones operacionales de SUNDIAL.** La aplicación computacional SUNDIAL del modelo Rothamsted, presenta algunas deficiencias de funcionamiento en su versión actual, las cuales deben ser mejoradas o incluidas en nuevas versiones de este programa. Actualmente la versión DOS no cuenta con una opción de impresión directa de cada pantalla activa del programa. Tampoco dispone de un formato de ingreso de datos meteorológicos del lugar geográfico de interés. Por otro lado, aparentemente, cada cierto período de tiempo, algunos archivos del programa son modificados generando dificultades en su uso.

**Ventajas del modelo SUNDIAL.** Las ventajas de SUNDIAL para realizar recomendaciones de fertilización nitrogenada, en comparación a otros métodos existentes en Chile, como el “método racional”, radican en la posibilidad de conocer en forma didáctica la dinámica del N en el sistema suelo-planta-atmósfera. SUNDIAL incluye tablas de balance anual, diagramas de flujo, gráficas bidimensionales, y de relación porcentual (gráfico de torta), que permiten cuantificar los distintos compartimentos del sistema, y las transformaciones ocurridas en cada ciclo de cultivo.

Los gráficos y hojas de balance entregadas por SUNDIAL para Mulchén y El Carmen, como resultado de cada simulación, permiten tener mayor conocimiento de los procesos y transformaciones del N ocurridas en cada ciclo de cultivos, con especial énfasis en las pérdidas de N producidas por lixiviación, lo cual constituye una fortaleza del modelo.

#### **Los modelos de simulación como herramienta para generar recomendaciones de fertilización.**

Una aplicación general de los modelos de simulación es en situaciones en las cuales se dificulta el muestreo, o cuando la interpretación del resultado del análisis de suelo es afectada por la técnica de muestreo, o por la manipulación posterior de la muestra (Geypens y Vandendriessche, 1996). Sin embargo, la utilidad de los mismos en la práctica, se ve limitada por el número y naturaleza de los datos que se ingresan. En este sentido, SUNDIAL aparece como un modelo con requerimientos simples de información.

La utilización de SUNDIAL y su uso práctico en condiciones locales, podría tener fundamentalmente tres objetivos: a) conocer la dinámica del ciclo del N durante cada cultivo en la rotación; b) verificar la estrategia de fertilización a realizar para algún cultivo de una rotación específica, y c) conocer el riesgo de pérdidas de N por lixiviación frente a una determinada estrategia de fertilización. Ahora que sabemos que la aplicación de SUNDIAL puede ser útil en nuestras condiciones, como herramienta de recomendación de fertilización nitrogenada, se justifica un estudio más extensivo que compare el modelo con mediciones de campo. Esto implica un trabajo de acceso al programa distinto al desarrollado aquí. Parámetros relevantes a comparar son, absorción de N, N residual, eventualmente N lixiviado, especialmente usando

datos experimentales de estudios con  $^{15}\text{N}$ . Además, existe una versión PC en desarrollo mejorada del modelo (v.g., versión Windows), que facilita su ejecución y que debería también ser considerada (Smith, J., 2001, Rothamsted, England, comunicación personal).

### CONCLUSIONES

- La utilización de SUNDIAL en condiciones locales, al contar con la información suficiente, permitió verificar la estrategia de fertilización nitrogenada actualmente en uso, y además estimó los riesgos de pérdida de N derivados de cada estrategia.
- El modelo SUNDIAL permitió precisar el conocimiento de los procesos e interacciones del N en las distintas rotaciones estudiadas.
- El uso de SUNDIAL en combinación con otros sistemas de recomendación de fertilización nitrogenada (ej. análisis de suelos) puede resultar en recomendaciones más exactas, que apunten a suplir los requerimientos del cultivo y disminuir riesgos de pérdidas de N.

### LITERATURA CITADA

Bradbury, N. J., A.P. Whitmore, P.B. S. Hart, and D.S. Jenkinson. 1993. Modelling the fate of nitrogen in crop and soil in years following application of  $^{15}\text{N}$ -labelled fertilizer to winter wheat. *J. Agric. Sci. (Cambridge)* 121:363-379.

Broadbent, F.E. 1984. Plant use of soil nitrogen. p. 171-182. *Agronomy* N° 22. In R. Hauck (ed.). *Nitrogen in Crop Production*. Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA.

Geypens, M., and H. Vandendriessche. 1996. Advisory systems for nitrogen fertilizer recommendations. *Plant Soil* 181:31-38.

Jenkinson, D.S., and L.C. Parry. 1989. The nitrogen cycle in the Broadbalk wheat experiment: a model for the turnover of nitrogen through the soil microbial biomass. *Soil Biol. Biochem.* 21:535-541.

Lambers, H. 1983. "The functional equilibrium", nibbling on the edges of a paradigm. *Neth. J. Agric. Sci.* 31:305-311.

MacDonald, A.J., P.R. Poulton, D.S. Powlson, and D.S. Jenkinson. 1997. Effects of season, soil type and cropping on recoveries, residues and losses of  $^{15}\text{N}$ -labelled fertilizer applied to arable crops in spring. *J. Agric. Sci. (Cambridge)* 129:125-154.

Myers, R.J.K., and E.A. Paul. 1971. Plant uptake and immobilization of  $^{15}\text{N}$ -labelled ammonium nitrate in a field experiment with wheat. p. 55-64. In: *Nitrogen-15 in soil plant studies*. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.

Olson, R.V., L.S. Murphy, H.C. Moser, and C.W. Swallow. 1979. Fate of tagged fertilizer nitrogen applied to winter wheat. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43:973-975.

Powlson, D.S., P.B.S. Hart, G. Pruden, and D.S. Jenkinson. 1986a. Recovery of  $^{15}\text{N}$ -labelled fertilizer applied in autumn to winter wheat at four sites in eastern England. *J. Agric. Sci. (Cambridge)* 107:611-620.

Powlson, D.S., G. Pruden, A.E. Johnston, and D.S. Jenkinson. 1986b. The nitrogen cycle in the Broadbalk Wheat Experiment: recovery and losses of  $^{15}\text{N}$ -labelled fertilizer applied in spring and inputs of nitrogen from the atmosphere. *J. Agric. Sci. (Cambridge)* 107:591-609.

Powlson, D.S., P.B.S. Hart, P.R. Poulton, A.E. Johnston, and D.S. Jenkinson. 1992. Influence of soil type, crop management and weather on the recovery of  $^{15}\text{N}$ -labelled fertilizer applied to winter wheat in spring. *J. Agric. Sci. (Cambridge)* 118:83-100.

Recous, S., C. Fresneau, G. Faurie and B. Mary. 1988a. The fate of labelled  $^{15}\text{N}$  urea and ammonium nitrate applied to a winter wheat crop. I. Nitrogen transformations in the soil. *Plant and Soil* 112:205-214.

Recous, S., C. Fresneau, G. Faurie and B. Mary. 1988b. The fate of labelled  $^{15}\text{N}$  urea and ammonium nitrate applied to a winter wheat crop. II. Plant uptake and efficiency. *Plant Soil* 112:215-224.

Rodríguez, J. 1993. La fertilización de los cultivos. 291 p. Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Agronomía, Santiago, Chile.

Silva, G., y A. Mansilla. 1993. Análisis de sistemas en producción animal: teoría y aplicaciones. 260 p. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Santiago, Chile.

Smith, J.U., N.J. Bradbury, and T.M. Addiscott. 1996. SUNDIAL: A PC-based system for simulating nitrogen dynamics in arable land. *Agron. J.* 88:38-43.

Boletín Agrometeorológico. 1999. Boletín Agrometeorológico. 24 p. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola, Chillán, Chile.

Universidad de Concepción. 2000. Agroclima Chillán, promedio de 30 años. Chillán. Estación Agroclimatológica. Disponible en: <http://www.chillan.udec.cl/clima/chillan/agroclima.html>. Leído 22-03-2000.

Wehrmann, J., and H.C. Scharpf. 1979. Der Mineralstickstoffgehalt des bodens als maßstab für den stickstoffüngerbedarf ( $\text{N}_{\text{min}}$ -methode). *Plant Soil* 52:109-126.

Whipps, J.M., and J.M. Lynch. 1990. Carbon economy. p. 59-97. *In* J.M. Lynch (ed.). *The Rhizosphere*. John Wiley and Sons, Chichester, UK.