

## APLICACIÓN DEL MODELO STICS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA LIXIVIACIÓN DE NITRATOS EN LA ZONA VULNERABLE DE VITORIA-GASTEIZ BAJO EL CULTIVO DE REMOLACHA AZUCARERA Y TRIGO

Miren Martínez<sup>1\*</sup>, Miryam M. de Sabando<sup>1</sup>, Eric Justes<sup>2</sup>, José Miguel Sánchez-Pérez<sup>3</sup> e Iñaki Antigüedad<sup>1</sup>

1: Departamento de Geodinámica  
Facultad de Ciencia y Tecnología  
Universidad del País Vasco – Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV-EHU)  
Barrio Sarriena s/n. Leioa (Bizkaia).48940  
e-mail: miren.martinez@gmail.com

2: Unité Agrosystèmes et développement territorial  
INRA-INP-ENSAT  
Castanet-Tolosan cedex (Toulouse). Francia. 31326

3: Laboratoire d'écologie fonctionnelle  
CNRS-UPS-INP-ENSAT  
Avenue de l'agrobiopole BP 107, Auzeville-Tolosane  
Castanet-Tolosan cedex (Toulouse). Francia. 31326

**Palabras clave:** Modelización, STICS, lixiviación de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Zona Vulnerable, fertilización.

**RESUMEN.** *Se ha aplicado el modelo STICS a los datos obtenidos de una parcela agrícola cultivada con una rotación de remolacha azucarera y trigo en la localidad de Gauna (municipio de Alegria-Dulantzi), dentro de la Zona Vulnerable del acuífero cuaternario de Vitoria-Gasteiz. El objetivo ha sido comparar los datos experimentales obtenidos a partir de los dispositivos instalados en la parcela con aquellos simulados por el propio modelo, obteniéndose datos representativos de aquellos procesos implicados en las pérdidas y/o ganancias de nitrógeno y agua. Una de las conclusiones más interesantes obtenidas a partir de este trabajo es la necesidad de dosificar y aplicar correctamente los riegos, ya que el regadío excesivo arrastra los nitratos del suelo (9 % en remolacha) produciéndose episodios de contaminación difusa de las aguas subterráneas.*

**ABSTRACT.** *The STICS model has been applied to the data of an agricultural plot of sugar beet and wheat rotation, it is located in Gauna (Alegria-Dulantzi county), in the Vulnerable Zone of the Quaternary aquifer of Vitoria-Gasteiz. The aim of this study has been to compare the data obtained of experimental devices in the field with the results calculated by the model and, thereby, the processes which are implicated in nitrogen and water budget could be estimated. One of the most interesting conclusion obtained in this study is the requirement of minimize the excess of irrigation, because this excess lead to the leaching of nitrates in the soil (9 % in sugar beet) and, consequently, a widespread pollution of ground waters.*

### 1. INTRODUCCIÓN

La contaminación difusa de las aguas superficiales y subterráneas como consecuencia directa de una agricultura extensiva y, especialmente, por la utilización de grandes volúmenes de fertilizantes orgánicos y/o inorgánicos es un serio problema en muchos lugares de Europa (Rasmussen, 1996; Arrate et al. 1997; Campling et al. 2005; Rozemeijer y Broers, 2007). El importante incremento de la concentración de nitrato en las aguas de buena parte de los valles agrícolas europeos, llevó a la Unión Europea a aprobar la Directiva 91/676/CEE, la cual impone a los Estados miembros la obligación de identificar aquellas zonas cuyas aguas estén afectadas, o

puedan llegar a estarlo, por nitratos de origen agrícola. Se establece en  $50 \text{ mgNO}_3^-/\text{l}$  el límite de referencia para las aguas subterráneas. La elevada concentración de compuestos nitrogenados en ríos y acuíferos no sólo supone un riesgo de contaminación ambiental (eutrofización), sino que este hecho también implica un cierto peligro potencial para la salud humana, especialmente para los bebés.

El acuífero cuaternario de Vitoria-Gasteiz (Álava, País Vasco) no es una excepción y representa un claro ejemplo de la degradación de la calidad de las aguas subterráneas, debido, principalmente, a importantes cambios agrícolas en las últimas décadas, como es el incremento de los cultivos de regadío (remolacha azucarera y patata) en detrimento de los cultivos tradicionales de secano (cereales). A su vez, la utilización de importantes dosis de fertilizantes inorgánicos también se vio incrementada en los últimos años. Es así que a principios de la década de los 90 se superaron los  $150 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$  en las aguas subterráneas (Arrate et al. 1997). A partir de mediados de los 90 esta concentración empezó a disminuir progresivamente; sin embargo, en la actualidad, a pesar de esa disminución se siguen superando asiduamente los  $50 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$  (Martínez, 2008). Tras los altos contenidos de nitratos hallados en las aguas de este acuífero, el Gobierno Vasco en el año 1998 (Decreto 390/1998) declaró Zona Vulnerable a la contaminación por nitratos al Sector Oriental del acuífero cuaternario de Vitoria-Gasteiz y, a su vez, se aprobó el Código de Buenas Prácticas Agrarias. Recientemente, en abril de 2008 (Orden 3170), se ha ampliado la Zona Vulnerable para incluir el Sector Dulantzi. De esta forma, la Zona Vulnerable resultante pasa a denominarse “Unidad Hidrogeológica Vitoria-Gasteiz, Sectores Oriental y Dulantzi”.

El impacto medioambiental que tiene la agricultura sobre el medio depende principalmente del tipo de cultivo, de las condiciones hidrometeorológicas (climatología e hidrogeología), del tipo de manejo y de las características del suelo. Por esta razón, los modelos suelo-cultivo que simulan el comportamiento del sistema suelo-planta en interacción con el clima y las técnicas de manejo pueden ser muy útiles en la predicción de la lixiviación de nitratos desde la zona no saturada del suelo al acuífero (Jégo et al. 2008).

Los modelos que simulan los cultivos, los momentos de fertilización y el balance hídrico se han multiplicado en los últimos años. Citemos por ejemplo los modelos CERES (Ritchie y Otter, 1984; Jones y Kiniry, 1986), ARCWHEAT (Weir et al. 1984), SWHEAT (Van Keulen y Seligman, 1987), CORNGRO (Childs et al. 1977), SIMTAG (Stapper, 1984). Este tipo de modelos pueden ser de gran ayuda a la hora de definir los riegos y las dosis de fertilización. Desde este punto de vista, este tipo de modelos han sido utilizados a escala regional en aplicaciones agrícolas y medio-ambientales (Varcoe, 1990; Jonhson y Cramb, 1991; Moen et al. 1994).

En un trabajo anterior (Jégo et al. 2008) se puso de manifiesto que, durante el cultivo de remolacha, en función de las condiciones iniciales del suelo y la cantidad e intensidad de los riegos se producían fuertes episodios de lixiviación de nitratos al acuífero. En el actual trabajo mediante la utilización del modelo STICS se quiere poner de manifiesto el papel de la sucesión de cultivos (remolacha – trigo), rotación característica de la zona, sobre la pérdida de nitratos a las aguas subterráneas. Debido a las interacciones entre la rotación de cultivos y su manejo y las condiciones edafoclimáticas, no siempre es fácil distinguir el papel individual que juega cada uno de estos dos factores y sus interacciones en la lixiviación (Brisson et al. 2003; Jégo et al. 2008).

La rotación de remolacha azucarera (*Beta vulgaris* L.) y trigo (*Triticum aestivum* L.) es muy común y representativa en la provincia de Álava, especialmente en la Zona Vulnerable. Los objetivos eran: (i) validar el modelo STICS utilizando los datos medidos directamente en campo para los dos cultivos; (ii) estimar la lixiviación de nitratos bajo ambos cultivos; (iii) cuantificar los episodios de infiltración profunda al acuífero.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Área de estudio

La parcela elegida para el estudio de la rotación de remolacha azucarera y trigo se localiza al este del pueblo de Gauna ( $42^\circ 49\text{N}$ ;  $2^\circ 29\text{W}$ ), en el Sector Dulantzi de la Zona Vulnerable de Vitoria-Gasteiz (Álava). Ésta posee una extensión de 3.55 ha y una pendiente casi nula. Durante los dos años controlados el nivel piezométrico en la parcela ha fluctuado entre los 0.5 y 2 m de profundidad a partir del suelo. El principal mecanismo de recarga al acuífero es por infiltración del agua de lluvia y, en momentos puntuales,

por el agua de riego.

Al inicio, intermedio y final de cada cultivo se recogieron muestras de suelo para su análisis y clasificación. La tabla 1 recoge los valores medios de los parámetros medidos en las cinco campañas. En función de su textura los horizontes superficiales (0-60 cm) han sido clasificados como franco-arcillosos, mientras que el más profundo (60-90 cm), con un contenido algo mayor de limo, es del tipo franco-arcillo-limoso. El contenido de nitrógeno en suelo al inicio de cada cultivo es introducido como valor inicial en cada simulación del modelo.

La precipitación media anual registrada en la estación meteorológica de Arkaute, dentro de la Zona Vulnerable, es de unos 600 mm. En la simulación de ambos cultivos se han utilizado las lluvias recogidas por el propio agricultor en el mismo pueblo de Gauna. Así en el periodo correspondiente al cultivo de remolacha (17 de abril – 30 de octubre de 2007) se registraron unos 470 mm; mientras que en trigo (31 de octubre de 2007 – 30 de julio de 2008) la precipitación fue de 750 mm. La temperatura media fue superior en el cultivo de remolacha (14.92 °C) que en trigo (9.34 °C).

**Tabla 1.** Valores medios de los parámetros físico-químicos medidos en el suelo de Gauna.

Profundidad (cm)	0-30	30-60	60-90
Arena (%)	22.3	22.2	16.1
Limo (%)	41.2	43.0	43.0
Arcilla (%)	36.5	36.8	38.4
pH en agua	8.4	8.4	8.5
CaCO <sub>3</sub> (%)	23.4	25.8	33.1
Densidad aparente	1.38	1.30	1.30
Capacidad campo (g agua/g suelo)	21.0	20.0	18.0
Pto. marchitez (g agua/g suelo)	14.5	15.4	16.2

## 2.2. Datos experimentales

El periodo modelado que incluye ambos cultivos va desde el 18 de abril de 2007 hasta el 30 de julio de 2008. Para los dos cultivos el suelo ha sido dividido en tres capas de 30, 30 y 60 cm respectivamente, correspondiéndose con los horizontes edafológicos, excepto la última capa más profunda.

La remolacha fue sembrada el 23 de abril y cosechada el 30 de octubre de 2007. El abonado de fondo se realizó el 20 de abril donde se aplicaron 61 kg N/ha, mientras que en el de cobertera, 4 de junio, se duplicó la cantidad de nitrógeno adicionada (119 kg N/ha). La remolacha al ser un cultivo de regadío recibió aportes de agua por aspersión a lo largo del periodo estival, en siete dosis (de 30 a 43 mm/día) entre finales de junio y principios de septiembre, aproximadamente cada diez días.

El trigo se sembró once días después de la recogida de la remolacha, el 10 de noviembre, y se recolectó el 30 de julio de 2008. Al igual que el anterior cultivo el trigo también recibe el fertilizante en dos dosis, el 25 de enero y el 5 de abril, y la cantidad de nitrógeno adicionada es muy similar al anterior cultivo, 58 y 130 kg N/ha, respectivamente. El trigo es un cultivo de secano por lo que no se riega.

Para llevar un buen seguimiento de los procesos implicados en las pérdidas y/o ganancias de nitrógeno y agua en la parcela y, de esta manera, obtener un mejor ajuste entre lo observado y lo modelado, se perforaron y acondicionaron en abril de 2007 dos piezómetros en los extremos de la parcela, uno aguas arriba (GAU 2) y otro aguas abajo (GAU 1), para la toma de muestras de agua subterránea y para el seguimiento de la evolución del nivel piezométrico. En ambos piezómetros se instalaron sendos dispositivos CTD-Diver (Van Essen Instruments), los cuales registran y almacenan de manera continua la variación del nivel piezométrico, en este caso a escala horaria. Este control es de gran importancia, ya que la evolución del nivel piezométrico permite precisar los momentos de recarga al acuífero (ascenso del nivel), bien por lluvias o bien por riegos, permitiendo así verificar la influencia de estos últimos sobre la lixiviación de nitratos. Aquí, únicamente, se han incluido los datos obtenidos en GAU 1 (aguas abajo), por ser más representativos.

A su vez se instalaron dieciséis dispositivos TENSIONICs (conjunto de tensiómetro y cápsula de succión, SDEC Francia) distribuidos en grupos de cuatro a lo largo de la parcela (grupo A, B, C y D), con el objetivo de

llevar a cabo el control químico del agua intersticial de la zona no saturada. La profundidad de éstos era de 50 (ocho dispositivos) y 100 cm (otros ocho).

### 2.3. Breve descripción del modelo STICS

Para el presente trabajo se ha utilizado el modelo STICS (Simulateur multIdisciplinaire pour les Cultures Standard), el cual ha sido principalmente desarrollado en el Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) de Francia. Este modelo realiza una simulación diaria del sistema suelo-cultivo (Brisson et al. 2003). Las variables de entrada son las relativas al clima (radiación solar, precipitación, evapotranspiración potencial, temperatura mínima y máxima), al suelo (características físico-químicas del suelo) y al cultivo (tipo de cultivo y prácticas agrarias relacionadas). Por otra parte, las variables de salida se corresponden a la producción (cantidad y calidad), el medio ambiente (agua, carbono y nitrógeno) y a la evolución del contenido de agua y nitrógeno en el suelo. La producción final viene limitada por los estreses abióticos (nitrógeno y/o agua) y bióticos (plagas); sin embargo, el modelo no contempla estos últimos.

Su objetivo principal es simular las consecuencias de las variaciones del medio y del sistema de cultivo sobre la producción de una parcela agrícola. Ha sido creado como una herramienta de trabajo, de colaboración y de transferencia de conocimientos entre diferentes campos científicos.

## 3. RESULTADOS

El primer resultado obtenido por el modelo STICS es el rendimiento final del cultivo. En la tabla 2 aparecen los datos de producción; en el caso de la remolacha el valor dado por el agricultor y el calculado (expresados con un contenido de azúcar del 20%), son equivalentes. Sin embargo, el dato de rendimiento calculado (12.23 t/ha) en trigo es muy superior al real (6 t/ha). Hay que tener en cuenta que el modelo no tiene en consideración ciertos factores como son las plagas, las cuales pueden afectar al rendimiento final. Por estos y/u otros motivos la producción de trigo para este periodo resultó ser inferior a lo esperado, según los agricultores de la zona.

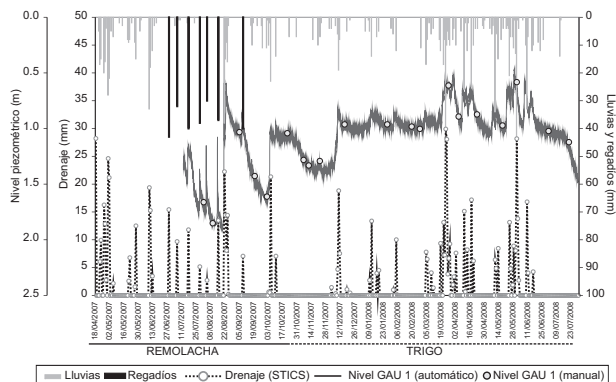
**Tabla 2.** Resultados del balance de agua, nitrógeno y rendimiento de cada cultivo.

	Rendimiento cultivo (t/ha)		Evaporación + Transpiración (mm)	I (mm)	Lixiviación N (kg N/ha)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> final suelo (kg N-NO <sub>3</sub> /ha)	
	Real	STICS	STICS	STICS	STICS	STICS	Real
Remolacha	104.62	112.29	229 + 203	340	32	9	14
Trigo	6.0	12.23	210 + 192	385	12	13	12

Comparando los resultados de lixiviación de nitrógeno (kg N/ha) e infiltración (mm) obtenidos por el modelo en ambos cultivos (tabla 2) se aprecia que a pesar de que la infiltración sea mayor en trigo el arrastre de nitrógeno es más del doble en remolacha. Hay que tener en cuenta que el ciclo del trigo coincide con los meses de invierno, más lluviosos (750 mm), mientras que las precipitaciones caídas en el cultivo de la remolacha han sido inferiores (470 mm). Por otra parte, la transpiración es algo superior en el caso de la remolacha. Esto puede deberse, por una parte, a la propia fisiología de la planta, ya que las hojas de la remolacha son más grandes y anchas, siendo la pérdida de agua mayor, y, en segundo lugar, porque gran parte del ciclo de crecimiento de la remolacha coincide con el verano y, por tanto, con las temperaturas más elevada. Existe un buen ajuste en el contenido de nitrato en suelo entre lo observado en trigo y lo simulado, unos 13 kg N/ha. En la remolacha el nitrato medido es superior al calculado por el modelo, aunque la diferencia no es grande, al menos en la etapa actual de aplicación del modelo.

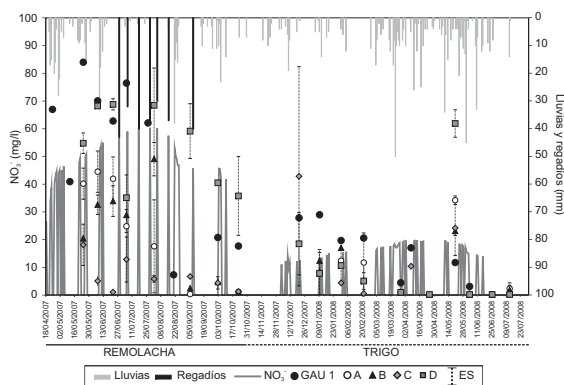
En la figura 1 aparecen representados todos los episodios de infiltración simulados por el STICS a escala diaria desde la siembra de la remolacha hasta la recolección del trigo. En esta figura también aparecen representados los datos observados en la parcela, como es la evolución del nivel piezométrico en GAU 1, medida a paso horario por el CTD-Diver (desde julio de 2007) y, a su vez, las medidas puntuales realizadas manualmente. Existe una buena correlación entre los episodios de recarga registrados por el dispositivo y los simulados por el STICS, lo que indicaría que la fiabilidad del modelo es buena, al menos, en este aspecto. No sólo las fuertes precipitaciones son responsables de las subidas de nivel sino que todos los riegos estivales

también provocan ascensos piezométricos, como se observa en la figura 1.



**Figura 1.** Episodios de infiltración (drenaje, mm) simulados por STICS, evolución piezométrica manual y automática en GAU 1 (profundidad del nivel, m), precipitaciones (mm/día) y riegos (mm/día) en la parcela de Gauna (2007-2008).

Todos los episodios de infiltración van acompañados por un arrastre de nitratos, tanto en remolacha como en trigo (figura 2). La diferencia entre cultivos viene determinada por la cantidad de nitrato lixiviado, siendo bastante mayor en remolacha (32 kg N/ha, tabla 2), a pesar de que el nitrógeno adicionado en los periodos de fertilización es muy similar en ambos cultivos (180 kg N/ha). En la figura 2 se compara la pérdida de nitratos ( $\text{mg NO}_3^-/\text{l}$ ) al acuífero calculada por el modelo con las concentraciones ( $\text{mg NO}_3^-/\text{l}$ ) obtenidas en las aguas subterráneas del piezómetro GAU 1, situado en la parte baja de la parcela, colector final de todas las aguas de drenaje de la parcela, y las aguas de los TENSIONICs. A pesar de que el agua succionada por los TENSIONICs no es agua estrictamente subterránea, sino intersticial del suelo, ha sido incluida en la figura a modo de comparativa, ya que ésta ha sido recogida a una profundidad de 100 cm, próxima a la posición del nivel piezométrico (entre 0.6 y 1.8 m).

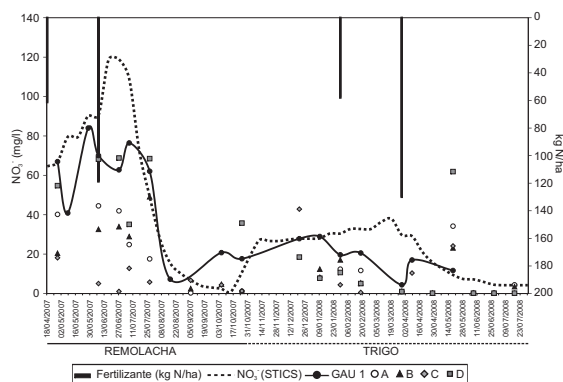


**Figura 2.** Episodios de lixiviación de nitratos ( $\text{mg NO}_3^-/\text{l}$ ) según STICS, contenido de nitratos medidos en las aguas subterráneas del piezómetro GAU 1 y en las aguas intersticiales de los TENSIONICs (grupos A, B, C, D) en remolacha y trigo.

En remolacha, el contenido de nitrato en el piezómetro y TENSIONICs decrece en la época estival, desde concentraciones superiores a  $60 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$  a inferiores a  $20 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$ . Aunque en trigo esta disminución no es tan acusada también existe una reducción de la lixiviación al final del periodo de cultivo (de  $20$  a  $5 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$ ). Sin embargo, en remolacha, los primeros regadíos provocan un importante arrastre de nitrógeno que queda reflejado en el GAU 1, superándose los  $50 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$ , y también en los TENSIONICs más cercanos a este piezómetro (grupo D). A pesar de que la lixiviación de nitratos simulada por el modelo no sea exactamente igual a la observada en campo, en medidas puntuales, sí se puede decir que, al menos, tanto la tendencia de la

evolución en el tiempo como la magnitud en el contenido de nitrato son comparables.

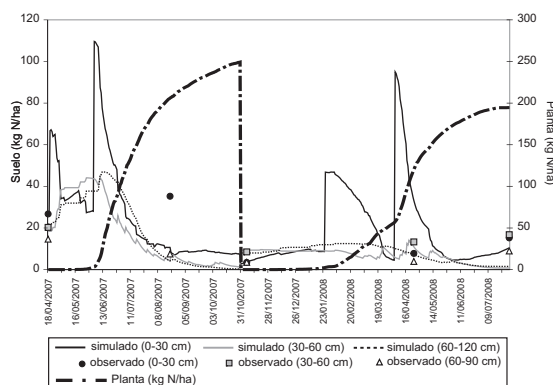
En la figura 3 se compara la evolución de la concentración de nitratos en el agua del suelo según el modelo, a 100 cm, con la obtenida por los TENSIONICs a esa misma profundidad. También se han incluido las concentraciones de las aguas subterráneas (GAU 1) y la cantidad de nitrógeno (kg N/ha) adicionado en cada fertilización. En la tendencia temporal del contenido de nitrógeno en suelo simulado por el modelo se observa una drástica disminución durante los últimos meses del ciclo del cultivo (figura 3). Este descenso es más acusado en remolacha, donde se registra primeramente un incremento del nitrógeno después del abonado de cobertera y seguidamente una bajada paulatina hasta el agotamiento total de este elemento a dicha profundidad. Ni los TENSIONICs ni las aguas subterráneas de los piezómetros registran, de forma clara, el incremento de nitrógeno por fertilización, lo que demuestra que es bastante complicado detectar este tipo de comportamientos con muestreos puntuales. En el último periodo de la simulación la concentración de nitrato recogida por los dispositivos es igual de baja que la simulada. Por el contrario, al inicio de la simulación de trigo se observa un incremento del contenido de nitrógeno en suelo debido, principalmente, a la mineralización de los restos orgánicos del cultivo precedente. Las concentraciones de nitrógeno en suelo introducidas al inicio de cada simulación son las obtenidas a partir de la analítica de suelos en el laboratorio. La evolución temporal del nitrato en trigo es similar a la observada en remolacha (figura 3); sin embargo, en este caso, el contenido de nitrato estimado por el modelo es ligeramente superior al observado en los dispositivos de campo. Aún y todo, a pesar de estos ciertos desajustes se puede decir que la estimación realizada por el STICS es inicialmente buena, en la fase actual de desarrollo de aplicación de este modelo a los cultivos de la llanada alavesa.



**Figura 3.** Evolución temporal del contenido de nitrato (mg/l) simulado por el modelo (de manera continua), del medido en los TENSIONICs de 1 m (grupos A, B, C y D) y del observado en el piezómetro GAU 1. También aparece representada la cantidad de nitrógeno (kg N/ha) adicionada en los periodos de fertilización en remolacha y trigo.

Comparar la evolución temporal del contenido de nitrógeno en suelo (kg N/ha) con la acumulación de éste en la planta a lo largo de su ciclo de desarrollo es otra de las posibilidades que ofrece el modelo STICS. La figura 4 muestra el contenido de nitrógeno simulado a escala diaria en los tres horizontes del suelo y, a su vez, el analizado de manera puntual (cinco campañas a lo largo del ciclo de la remolacha y trigo) en el laboratorio. En el horizonte más superficial (0-30 cm) se observa claramente el aumento de nitrógeno en el suelo producido por los abonados de fondo (22 de abril de 2007 y 25 de enero de 2008) y cobertera (4 de junio de 2007 y 5 de abril de 2008) en ambos cultivos. Durante el ciclo de la remolacha se observa una pérdida de nitrógeno en superficie (2 de mayo de 2007) coincidente con una ganancia en los horizontes más profundos; este hecho vendría justificado por los episodios de percolación previos a este momento y que han sido calculados por el modelo (figura 1). Por otra parte, mientras que el abonado de fondo no parece tener un efecto en la acumulación de nitrógeno en remolacha, ya que una parte importante se ha lixiviado (figura 2), no ocurre lo mismo con el de cobertera (figura 4). A partir de mediados de junio el contenido de nitrógeno disminuye progresivamente en todo el perfil del suelo a medida que la planta lo absorbe. En el momento de su recolección el nitrógeno en suelo es inferior a 10 kg N/ha, mientras que la remolacha ha acumulado unos 250 kg N/ha. En el caso del trigo, el

nitrógeno adicionado en el primer abonado permanece más tiempo en el suelo, el número de episodios de drenaje en este periodo disminuye y su intensidad también es menor (figura 1), lo que conlleva a una acumulación más temprana de nitrógeno en la planta. Sin embargo, al igual que en remolacha, la mayor reserva de nitrógeno en planta se produce después del segundo abonado con la consiguiente disminución de éste en el suelo (mediados de abril). Al final del ciclo, el modelo estima que la cantidad de nitrógeno en el perfil es de unos 10 kg N/ha, muy similar a la obtenida en el laboratorio, mientras que el trigo ha almacenado algo menos de 200 kg N/ha.



**Figura 4.** Evolución diaria del contenido de nitrógeno (kg N/ha) en los tres horizontes del suelo según STICS (simulado), lo obtenido en los análisis del laboratorio (observado) y el acumulado en la planta (remolacha y trigo) a lo largo del ciclo de desarrollo.

Respecto al balance de nitrógeno para el periodo de simulación de la remolacha, inicialmente en el suelo hay 68 kg N-NO<sub>3</sub>/ha, a los que hay que añadir 180 kg N/ha de fertilizante, además de otros aportes de menor entidad (lluvias, agua de regadío...), haciendo un total de 349 kg N/ha, de los cuales el cultivo de remolacha acumula al final 249 kg N/ha. De la diferencia, una parte es lixiviada (32 kg N/ha) y el resto el modelo lo asigna a procesos de volatilización-desnitrificación, además de la parte que queda finalmente en el suelo (9 kg N-NO<sub>3</sub>/ha). En el caso del trigo, de los 278 kg N/ha iniciales (abonos, suelo y lluvias) un 70 % (195 kg N/ha) es aprovechado por el cultivo, mientras que el nitrógeno restante se pierde por otras vías como son la lixiviación y volatilización, y una pequeña parte permanece en el suelo (13 kg N-NO<sub>3</sub>/ha).

#### 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La aplicación del modelo STICS a los datos experimentales obtenidos de la parcela de Gauna ha permitido cuantificar determinados parámetros que no podrían haber sido calculados mediante los datos recogidos durante este seguimiento, como es el balance diario de nitrógeno (kg N/ha) en el suelo, la cantidad de nitrógeno lixiviado en cada episodio de recarga (mg/l) y el asimilado por cada cultivo a lo largo de su ciclo. A su vez, la utilización de este modelo permite simular diferentes condiciones de prácticas agrarias, como es la rotación de remolacha y trigo, la influencia de los regadíos o dosis de fertilización, y, a su vez, cuantificar la repercusión de éstas sobre el medio (contaminación de suelo, aguas y atmósfera, ya que también se obtienen datos de volatilización y desnitrificación de nitrógeno). En la Zona Vulnerable de la llanada alavesa esto cobra especial interés debido a la gran variedad de cultivos y prácticas agrarias cambiantes en el tiempo y en el espacio, así como a la variabilidad de las condiciones meteorológicas y edafológicas, todo ello considerado por el modelo a la hora de realizar la simulación. Sin embargo, este modelo no tiene en cuenta factores biológicos, como son las plagas, los cuales pueden afectar seriamente la producción final y, por tanto, el ajuste entre lo observado y lo simulado por el modelo no es bueno. Esto ha ocurrido con la producción de trigo.

Una de las conclusiones más interesantes obtenidas a partir de las simulaciones aquí expuestas es la necesidad de dosificar y aplicar correctamente los riegos, ya que el regadío excesivo no sólo provoca episodios innecesarios de recarga al acuífero sino que estos arrastran los nitratos presentes en el suelo, dando lugar a la

contaminación de las aguas subterráneas donde en numerosas ocasiones se superan los 50 mg NO<sub>3</sub>/l impuestos por la Directiva 91/676/CEE. A pesar de que la cantidad de agua infiltrada sea mayor durante el ciclo del trigo, periodo invernal, las pérdidas de nitrógeno por lixiviación son menores que en el caso de la remolacha. Según los datos aportados por el modelo para la remolacha y trigo, se habrían lixiviado 32 y 12 kg N/ha, respectivamente. Estas cantidades suponen un 9 y 4 % del total de N aportado al suelo. Siendo, por tanto, la remolacha el cultivo que mayores pérdidas de nitrógeno presenta. La mayoría del nitrógeno aportado, entre un 52 y un 73 % dependiendo del cultivo, pertenece a los abonados, mientras que el resto corresponde a la reserva inicial del suelo y a la mineralización del humus.

En otros trabajos anteriores (Jégo et al. 2008) ya se obtuvieron importantes conclusiones de la simulación de dos cultivos, patata y remolacha, en otras parcelas de la llanada alavesa. Incluso bajo las mismas condiciones de fertilización e irrigación, se observó que la concentración de nitrato (mg/l) en las aguas de drenaje bajo el cultivo de patata era muy superior a la de remolacha. En este caso se recomendaba plantar un cultivo intermedio entre la patata y la remolacha con el fin de minimizar el riesgo de contaminación por lixiviación de nitrato a las aguas subterráneas. En el caso de los cultivos consecutivos, remolacha y trigo, aquí expuestos, se observa que con fertilizaciones casi iguales es la remolacha el cultivo que mayor cantidad de nitrato lixivia y no sólo durante los regadíos. La rotación de estos dos cultivos, además de ser una práctica muy extendida en toda la llanada alavesa, resulta ser beneficiosa, ya que el nitrógeno acumulado en el suelo después de la cosecha de la remolacha es aprovechado por el trigo, disminuyéndose enormemente la lixiviación. Se trata de algunos ejemplos de aplicación del modelo STICS, que puede tener una gran potencialidad de uso en zonas agrícolas.

*Agradecimientos.* Esta investigación ha sido auspiciada por el Departamento de Agricultura del Gobierno Vasco – Eusko Jaurlaritza, y se enmarca en un estudio más amplio sobre la dinámica de los nitratos en el acuífero cuaternario de Vitoria-Gasteiz (proyecto CGL2006-06485 del Ministerio de Ciencia e Innovación, y Grupo Consolidado (GIC07/08-IT-392-07) del Gobierno Vasco-Eusko Jaurlaritza).

## REFERENCIAS

- Arrate, I., J.M. Sánchez-Pérez, I. Antigüedad, M.A. Vallecillo, V. Iribar, y M. Ruiz, 1997. Groundwater pollution in Quaternary aquifer of Vitoria-Gasteiz (Basque Country, Spain). *Environmental Geology*, 30 (3/4), 257-265
- Brisson, N, C. Gary, E. Justes, R. Roche, B. Mary, y D. Ripoche, 2003. An overview of the crop model STICS. *Eur. J. Agron.*, 18(3-4), 309–332.
- Campling, P., J.M. Terres, S. Vande Walle, J. Van Orshoven, y P. Crouzet, 2005. Estimation of nitrogen balances from agriculture for EU-15: spatialisation of estimates to river basins using the CORINE Land Cover. *Physics and Chemistry of the Earth*, 30, 25-34
- Childs, S.W., J.R. Gilley, y W.E. Splinter, 1977. A simplified model of corn growth under moisture stress. *Trans. ASAE*, 20, 858-865.
- Jégo, G., M. Martínez, I. Antigüedad, M. Launay, JM. Sánchez-Pérez, y E. Justes, 2008. Evaluation of the impact of various agricultural practices on nitrate leaching under the root zone of potato and sugar beet using the STICS soil-crop model. *Science of the total environment*, 394, 207-221
- Johnson, A.K.L., y R.A. Cramb, 1991. Development of a simulation based land evaluation system using crop modelling expert systems and risk analysis. *Soil Use Manage*, 7, 239-246.
- Jones, C.A., y J.R. Kiniry, 1986. CERES-Maize, A Simulation Model of Maize Growth and Development. Texas A&M University Press, College Station, TX.
- Martínez, M., 2008. Dinámica espacio-temporal de la calidad de las aguas de la Zona Vulnerable de Vitoria-Gasteiz (País Vasco). Funcionalidad del Humedal de Salburua en la atenuación de nitratos. Tesis Doctoral, Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea, 307.
- Moen, T.N., H.M. Kaiser, y S.J. Riha, 1994. Regional yield estimation using a crop simulation model: concepts, methods and validation. *Agric. Syst.*, 46, 79-92.
- Rasmussen, P., 1996. Monitoring shallow groundwater quality in agricultural watersheds in Denmark. *Environmental Geology*, 27, 309-319
- Ritchie, J.T., y S. Otter, 1984. Description and performance of CERES-Wheat, a user-oriented wheat yield model. USDA-ARS-SR Grassland Soil and Water Research Laboratory, Temple, TX, 159-175.
- Rozemeijer, J.C., y H.P. Broers, 2007. The groundwater contribution to surface water contamination in a regional with intensive agricultural land use (Noord-Brabant, The Netherlands). *Environmental Pollution*, 148, 695-706
- Stapper, M., 1984. Simtag: A Simulation Model of Wheat Genotypes. Model Documentation. ICARDA Publication, Aleppo, Syria.
- Van Keulen, H., y N.G. Seligman, 1987. Simulation of Water Use Nitrogen Nutrition and Growth of a Spring Wheat Crop. Simulation Monograph, Pudoc, Wageningen.
- Varcoe, V.J., 1990. A note on the computer simulation of crop growth in agricultural land evaluation. *Soil Use Manage*, 6, 157-160.
- Weir, A.H., P.L. Bragg, J.R. Porter, y J.H. Rayner, 1984. A winter wheat crop simulation model without water or nutrient limitations. *J. Agric. Sci.*, 102, 371-382.