



Open Archive Toulouse Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <http://oatao.univ-toulouse.fr/>
Eprints ID: 6136

To cite this document:

García-Linares, C. and Martinez, M. and Sanchez-Pérez, José-Miguel and Justes, Eric and Antigüedad, I. *Aplicación del modelo stics para la determinación de la lixiviación de nitratos bajo cultivo de remolacha azucarera en la zona no saturada del suelo.* (2003) In: Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol. VI, 5-7 Nov 2003, Valladolid, Spain.

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: staff-oatao@inp-toulouse.fr

APLICACIÓN DEL MODELO STICS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA LIXIVIACIÓN DE NITRATOS BAJO CULTIVO DE REMOLACHA AZUCARERA EN LA ZONA NO SATURADA DEL SUELO

C. García-Linares¹, M. Martínez¹, J.M. Sánchez-Pérez², E. Justes³ e I. Antigüedad¹

¹ Grupo de Hidrogeología, Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea, 48940 Leioa (Bizkaia), gopanai@lg.ehu.es

² Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes (LEH, FRE CNRS-UPS 2630), Université Paul Sabatier, 31055 Toulouse (Francia), sanchez@ecolog.cnrs.fr

³ Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), UMR ARCHE, Auzeville, 31326 Castanet-Tolosan Cedex (Francia), justes@toulouse.inra.fr

RESUMEN. Se ha aplicado el modelo STICS a los datos de una parcela experimental de remolacha azucarera situada en la localidad de Matauko, dentro de la Zona Vulnerable del acuífero cuaternario de Vitoria-Gasteiz. En dicha parcela se aplicaron seis tratamientos diferentes y se estudió la lixiviación de nitratos en cuatro de las aplicaciones.

El objetivo de este estudio ha sido comparar los resultados del modelo con los obtenidos en el campo. Se han modelizado cuatro de los tratamientos aplicados en la parcela, simulando a nivel diario el balance de agua y de nitrógeno (kg N/ha) en suelo y planta. Los resultados del modelo coinciden bien con los experimentales, sobre todo en los momentos de episodios claros de infiltración, y en la evolución de la concentración en nitratos, con una notable disminución en las concentraciones en la parte final del periodo considerado.

ABSTRACT. The STICS model has been applied to the data of an experimental plot of sugar beet located in Matauko, in the Vulnerable Zone of the Quaternary aquifer of Vitoria-Gasteiz. In this plot six different treatments were applied and the nitrate leaching was studied.

The aim of this study has been to compare the results of the model with the data obtained in the field. Four of the treatments applied in the plot has been modelled, simulating the daily balance of water and nitrogen (kg N/ha) in the soil and in the plant. Model's results adjusted enough good with the experimental data, in the moments of clear episodes of infiltration, and in the evolution of the concentration in nitrates, with a notable decrease in the concentrations in the final part of the considered period.

1. Introducción

Los modelos de simulación de cultivos y su balance hídrico y de fertilizantes 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; Van Lanen *et al.*, 1992; Singh y Thornton, 1992; Lal *et al.*, 1993; Moen *et al.*, 1994).

Se ha aplicado el modelo STICS (Simulateur multidisciplinaire pour les Cultures Standard) en una parcela experimental cultivada con remolacha azucarera en la localidad de Matauko, dentro de la Zona Vulnerable del acuífero cuaternario de Vitoria-Gasteiz, a muy pocos kilómetros de Vitoria-Gasteiz. Este modelo ha sido desarrollado en el Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) de Francia y su uso ha sido posible mediante la colaboración que de forma habitual, y en este estudio más concretamente, mantiene el Grupo de Hidrogeología de la UPV-EHU con el Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes (CNRS) de Toulouse.

El modelo STICS ha sido utilizado para modelizar los flujos de lixiviación de nitratos hacia la zona no saturada del suelo. Este modelo ofrece la posibilidad de ser utilizado con diferentes tipos de cultivos y en distintas condiciones de prácticas agrarias, pudiendo ser una herramienta de importancia para la evaluación, y cartografía, de la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas.

La novedad del STICS se basa en tres características principales que han influenciado en su diseño estructural. En contraste con muchos modelos de cultivos, STICS no fue concebido únicamente para reunir los datos más recientes. Se construyó como una herramienta de simulación capaz de trabajar bajo condiciones agrícolas y con variables de entrada disponibles fácilmente.

STICS fue concebido como un modelo genérico, capaz de adaptarse fácilmente a varios tipos de plantas. Los formalismos fueron también elegidos por su naturaleza genérica.

STICS tiene una construcción modular, representando cada módulo un proceso (o grupo de procesos) que tienen lugar en el sistema suelo-cultivo (Brisson *et al.*, 1998).

2. Material y métodos

2.1. Presentación del modelo STICS

STICS (Copyright INRA-Institut National de la Recherche Agronomique-Logiciel déposé à l'Agence pour la Protection des Programmes n° 99 17002600) es un modelo de funcionamiento de cultivos a nivel diario escrito en FORTRAN 77 (Brisson *et al.*, 1998, 2002). Sus variables de entrada son las relativas al clima (radiación solar, temperaturas mínima y máxima, lluvia, evapotranspiración de referencia), al suelo (concentración NO₃, NH₄, pH, profundidad de los horizontes, humedad a la capacidad de campo y al punto de marchitez, densidad aparente...) y al sistema de cultivo (densidad y profundidad de la semilla, regadío, tipo de fertilizante...). Sus variables de salida son las relativas a la producción (cantidad y calidad), al medio ambiente y a la evolución de las características del suelo bajo el efecto del cultivo. STICS ha sido concebido como una herramienta de simulación operativa en condiciones agrícolas. Su objetivo principal es simular las consecuencias de las variaciones del medio y del sistema de cultivo sobre la producción de una parcela agrícola.

Desde un punto de vista conceptual, STICS incluye algunas partes originales pero la mayoría de las partes hacen llamamiento a formalismos clásicos o proceden de modelos existentes. Sus puntos fuertes son los siguientes:

- adaptabilidad a diferentes cultivos (trigo, maíz, soja, sorgo, lino, praderas, tomate, remolacha, girasol, guisante, colza, plátano, caña de azúcar, zanahoria, lechuga...),
- capacidad de simular diferentes condiciones pedoclimáticas,
- una relativa facilidad de acceso a los parámetros y variables de entrada,
- posibilidad de añadir nuevos módulos (p.ej.: volatilización del amoníaco, fijación simbiótica del nitrógeno, mulch vegetal, suelo pedregoso, residuos orgánicos múltiples...).

STICS es un modelo dinámico, que simula el comportamiento del sistema suelo-cultivo a nivel diario. El límite superior del sistema es la atmósfera caracterizada por las variables climáticas estándar y el límite inferior corresponde a la interfaz suelo/subsuelo.

El cultivo se caracteriza globalmente por su biomasa aérea (carbono y nitrógeno), su índice foliar así como el número y la biomasa (carbono y nitrógeno) de los órganos cosechados. Así, los órganos vegetativos (hojas, ramificaciones o tallos) no son individualizados. El suelo se considera como una sucesión de capas horizontales (de 1 cm de espesor cada una), estando caracterizadas cada una de estas capas por su contenido en agua, en nitrógeno mineral y en nitrógeno orgánico. Las raíces, que permiten las interacciones entre el suelo y el cultivo, están definidas por su distribución longitudinal en el perfil del suelo.

STICS simula el balance de carbono, de agua y de nitrógeno del sistema y permite calcular a la vez las variables agrícolas (rendimiento, consumo de fertilizantes) y las variables medioambientales (pérdidas de agua y de nitrato) en diversas situaciones agrícolas.

El crecimiento se simula por el balance de carbono, esto es, intercepción de la radiación solar por las hojas, luego transformación en biomasa aérea y, durante la fase final del ciclo, en órganos para ser cosechados. Dado que el balance de nitrógeno depende parcialmente del balance de carbono, ambos se simulan al mismo tiempo. Un índice térmico, ajustado eventualmente para efectos fotoperiódicos y de vernalización según el tipo de planta, controla el desarrollo del cultivo. La posibilidad de estrés hídrico o por nutrientes se tiene en cuenta mediante tres índices que pueden reducir el crecimiento de la hoja y la eficacia de uso de la radiación cuando los nutrientes son limitados. Estos índices se computan en los balances de agua y nitrógeno.

El modelo se presenta en siete módulos: desarrollo, crecimiento de los brotes, componentes de la cosecha, crecimiento de las raíces, balance de agua, entorno térmico y balance de nitrógeno. Para cada módulo, se da un sumario de los parámetros de entrada y variables en uso. Los parámetros independientes del suelo, la planta y la gestión del cultivo se consideran parámetros estructurales y no parámetros de entrada.

2.2. Dispositivo experimental

Se han comparado 4 tratamientos de los 6 realizados (para más información ver Martínez *et al.* 2003 en este mismo volumen), en una parcela experimental cultivada con remolacha azucarera en la localidad de Matauko, dentro de la Zona Vulnerable del acuífero cuaternario de Vitoria-Gasteiz, a muy pocos kilómetros de Vitoria-Gasteiz. Dos de los tratamientos (Umostart y Fisiostart) se excluyeron del estudio ya que las dosis de abono utilizadas eran similares a las de los casos seleccionados. Una experiencia se realizó sin abono ninguno (Testigo-0), en las otras tres se añadieron diferentes dosis de fertilizante en dos fechas (15/03/02 y 31/05/02). Las dosis aplicadas fueron las siguientes: 25 + 69 = 94 kg N/ha (Habitual-1), 17 + 69 = 86 kg N/ha (Urea-2) y 110 + 94 = 204 kg N/ha (habitual según Agricultor-3).

El análisis textural de los horizontes muestra que los horizontes superficiales poseen una textura arcillosa, mientras que los horizontes subsuperficiales presentan una textura más limosa, aunque el porcentaje de arcilla sigue siendo importante (para más información véase Martínez *et al.*, 2003).

Para ejecutar el modelo se realiza un fichero técnico para cada uno de los tratamientos considerados, para el fichero del suelo se han considerado los valores medios de los diferentes perfiles analizados en la parcela. El periodo de simulación va desde el 13/02/02 hasta el 31/12/02.

3. Resultados

En la tabla 1 se resumen los resultados obtenidos mediante el modelo del balance hídrico y de lixiviación de nitratos.

Tabla 1. Principales resultados del balance de agua y nitrógeno y rendimiento del cultivo para el periodo de simulación. ETR: Evapotranspiración, I: Infiltración.

N	Rendimiento t/ha	ETR mm	I mm	Lixiviación N kgN/ha	NO ₃ fin kgN/ha
0	40.30	562	87	7	7
1	40.30	565	85	9	6
2	40.93	565	85	9	7
3	40.93	565	85	15	10

Como se aprecia en la tabla 1, no existen grandes diferencias entre los resultados obtenidos para los diferentes tratamientos. En el Testigo, que no ha sido abonado, se observa una menor cantidad de nitrógeno lixiviado, 7 kg N/ha. Las mayores cantidades lixiviadas se producen, como era de suponer, en el tratamiento habitual según Agricultor, donde la cantidad de fertilizante es considerablemente superior al resto, lixiviándose 15 kg N/ha de nitrógeno. En los tratamientos de Urea y Habitual la cantidad lixiviada es intermedia, de 9 kg N/ha.

En relación al rendimiento del cultivo, de algo más de 40 toneladas de remolachas por hectárea, la simulación se aproxima bastante al dato real, 45 t/ha (este valor se ha calculado tomando el peso medio de las diferentes muestras que se recogieron previamente a la recogida total de la remolacha: 118 kg en 26 m² de parcela), lo que confirmaría la validez del modelo, o, al menos, un buen ajuste en el rendimiento.

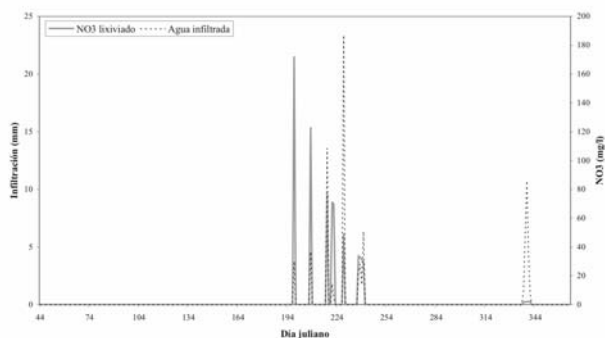


Fig. 1. Evolución diaria de la cantidad de agua drenada (mm) y de la concentración en nitrato de esas aguas (mg/l) para Habitual según el modelo.

La figura 1 muestra la cantidad de agua infiltrada (mm) y la concentración en nitrato (mg/l NO₃) de dichas aguas a escala diaria para Habitual.

La gráfica muestra 6 etapas claras de infiltración, 5 durante los meses de julio y agosto, que se corresponden, sobre todo, con los días de riego, y una última a principios de diciembre, correspondiente a un periodo muy lluvioso.

Así, el modelo STICS considera, por ejemplo, que el primer regadío (40 mm el 7/07/2002; 188 juliano) no origina recarga, los otros sí, mientras que el balance hídrico del suelo realizado con los datos experimentales (Martínez *et al.*, 2003) da recarga en ese momento. Este balance, realizado entre el 22/02/02 y el 31/12/02, proporcionaba una infiltración total de 207 mm, para una lluvia total,

incluido regadío (200 mm), de 687 mm. El modelo STICS proporciona una infiltración de 85 mm para una lluvia total de 709 mm (509 + 200), correspondiente a un periodo de tiempo ligeramente mayor (desde 13/02/02).

También se observa en la figura 1 cómo la concentración en nitratos de las aguas de infiltración disminuye progresivamente, desde valores en torno a los 180 mg NO₃/l, en los primeros episodios de recarga, hasta valores inferiores a 10 mg NO₃/l a finales de año. Dicho de otra forma, la mayor parte de la lixiviación de nitratos hacia las aguas subterráneas es debida al exceso de regadío en la parcela. Esta evolución se había ya observado en los análisis de las aguas recogidas en la parcela (Martínez *et al.*, 2003).

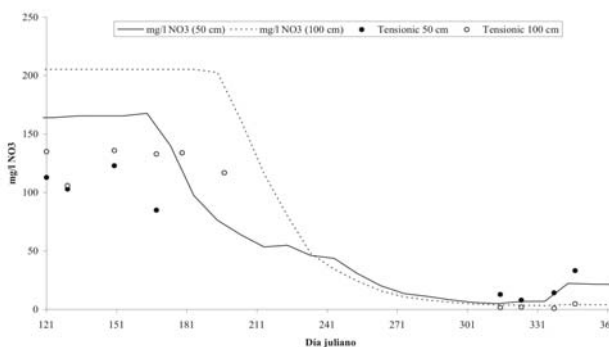


Fig. 2. Evolución de la concentración en nitratos (mg/l NO₃) en las aguas del suelo según modelo y según analítica para Habitual.

En la figura 2 se compara la evolución suministrada por el STICS con la derivada de la analítica de las aguas obtenidas mediante dispositivos Tensionic para el tratamiento 1 (Habitual). El ajuste es bueno, si bien el modelo aporta concentraciones en nitratos superiores a las realmente encontradas en los primeros meses de seguimiento, mayores en cualquier caso en el horizonte más profundo. Las concentraciones iniciales las calcula el modelo a partir de la cantidad de nitrato presente en el suelo antes del cultivo, lo que explica la diferencia entre las calculadas por el modelo y las medidas con los Tensionic. Resulta obvio en los dos métodos, STICS y Tensionic, la notable disminución habida en las concentraciones en la parte final del periodo considerado, a partir de octubre, de manera que en esa parte final el ajuste es mejor.

La figura 3 muestra la evolución del contenido en nitrógeno (kg N/ha) para dos horizontes de suelo; teniendo en cuenta que el modelo STICS discretiza el suelo en capas de 1 cm de espesor. Esta figura, en concreto, se refiere a los resultados para el tratamiento 1 (Habitual), pero es parecida, en la evolución, para el resto de tratamientos considerados, excepción hecha, obviamente, del Testigo (0), donde se evidencia la falta de abonado, de fondo y de cobertera. Es también evidente el mayor aporte nitrogenado del Agricultor, con mayor cantidad de N en superficie, alcanzando los 140 kg N/ha, por encima de los 85-87 kg N/ha de Urea y Habitual. En el horizonte más superficial (0-40 cm) se observa claramente el aumento de nitrógeno

en el suelo producido por el abonado de fondo (día 74) y posteriormente el de cobertera (día 151). Se observa también, en todos los casos, una pérdida de nitrógeno (día 128) coincidente con una ganancia en el horizonte profundo; para este momento el balance hídrico del suelo justifica la existencia de percolación al acuífero, aunque el modelo sólo admite aumento de humedad en el horizonte profundo. A partir del día 164, más o menos (mediados de junio), se observa un progresivo descenso en ambos horizontes. Las cantidades de N presentes en el horizonte profundo disminuyen más rápidamente en el Testigo y menos rápidamente en el Agricultor.

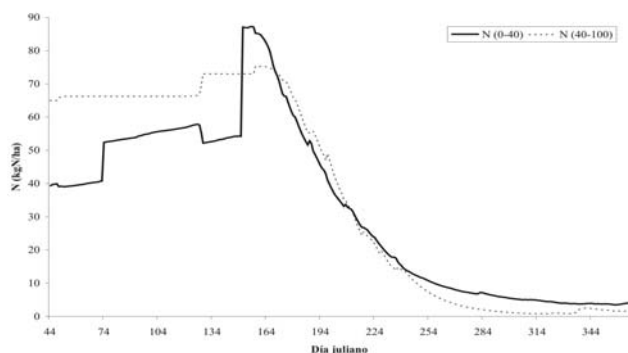


Fig. 3. Evolución diaria de la cantidad de nitrógeno presente en el suelo (kg N/ha) de 0 a 40 cm y de 40 a 100 cm para Habitual.

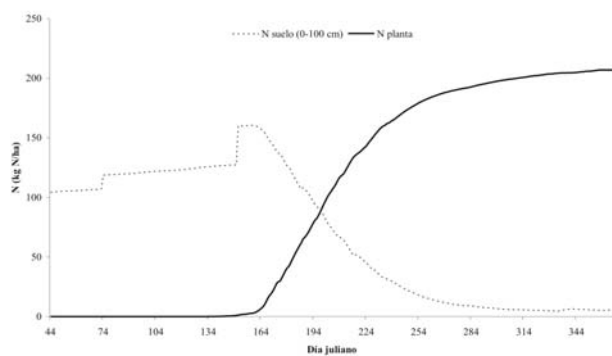


Fig. 4. Evolución diaria de la cantidad de nitrógeno en la planta de remolacha (kg N/ha) y en el suelo (0-100 cm) para Habitual.

En la figura 4 se muestra la evolución diaria de la cantidad de nitrógeno (kg N/ha) en la planta de remolacha y en el suelo, para lo que se ha sumado la cantidad de nitrógeno presente en los dos horizontes de suelo (0-100 cm), teniendo en cuenta que el modelo considera para la remolacha un frente radicular máximo de 100 cm, lo que supone que la planta podría adquirir nitrógeno hasta esa profundidad. Para el resto de casos la evolución es similar, empezando la acumulación en planta en el mismo momento. Al final, la cantidad de nitrógeno (kg N/ha) en la planta es de 207 en el Habitual, 173 en el Testigo, 212 en la

Urea y 258 en el Agricultor. Hay que recordar que en el Testigo no hubo ningún tipo de abonado, por lo que el N en la planta fue tomado del previamente presente en el suelo.

A la vista de esta figura es evidente que la disminución de nitrógeno en el suelo coincide, en el tiempo, con el incremento de nitrógeno en la planta. Lo expuesto en la figura, a modo de ejemplo, corresponde al tratamiento 1 (Habitual).

Respecto al balance de nitrógeno para el periodo de simulación, inicialmente en el suelo hay 104 kg N/ha, a los que hay que añadir 94 kg N/ha por fertilización (Habitual), además de otros aportes de menor entidad (lluvias, agua de regadío,...), haciendo un total de 271 kg N/ha, de los cuales el cultivo de remolacha acumula al final 207 kg N/ha. De la diferencia, una pequeña parte es lixiviada (9 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.

Similares resultados proporciona el modelo para el resto de tratamientos considerados, y que han sido ya recogidos en la tabla 1. Resulta así que la cantidad de nitrógeno aplicado en los distintos tratamientos, junto con el nitrógeno presente, antes del abonado de fondo, en el terreno ha sido tomado, en una gran proporción, por el cultivo. La cantidad de N lixiviado (kg N/ha) ha sido similar en el Testigo, Habitual y Urea (7-9 kg N/ha) pero mayor en el Agricultor (15 kg N/ha). En este último tratamiento también ha sido mayor la cantidad de N finalmente retenida en el suelo (10 kg N/ha, para 6-7 kg N/ha del resto).

Se deduce que el Agricultor aportó mayores cantidades de N que las necesarias, habida cuenta de que al inicio del cultivo la cantidad de N presente en el suelo (104 Kg N/ha) era importante. Este aspecto es de gran interés ya que la notable presencia previa de N en el suelo fue consecuencia, sobre todo, de la escasa lixiviación del suelo debida a la baja percolación que tuvo lugar en la parcela en los meses anteriores al inicio del cultivo de remolacha. Las lluvias del invierno 2001-2002 fueron muy escasas lo que justifica la permanencia de esa cantidad de N inicial en el suelo.

Con objeto de hacer un ejercicio de optimización de la lixiviación de nitratos en el suelo, manteniendo el rendimiento del cultivo, se ha vuelto a aplicar el modelo STICS para algunos tratamientos. El objetivo era optimizar los riegos, en fechas y en dosis, para que, como consecuencia, la lixiviación al acuífero hubiera sido nula, es decir, 0 mm de percolación, y, por tanto, 0 kg N/ha de incorporación a las aguas subterráneas. Este ejercicio debe servir para hacer una valoración de las dosis y fechas de regadío realmente dadas en el cultivo bajo estudio.

Resulta que para el abonado realmente realizado, en marzo (25 kg N/ha) y en mayo (69 kg N/ha), para Habitual, se hubiera conseguido un rendimiento de cultivo similar con un regadío total de 80 mm, en lugar de los 200 mm realmente aplicados (40 mm/día en 5 días desfasados 10 días, a partir del 7 de julio; figura 6). La distribución de esos 80 mm queda como sigue: 20 mm a finales de marzo, 30 a mediados de septiembre, y otro tanto a principios de octubre. Con esas dosis de regadío y de abonado la

infiltración resultante hubiera sido nula (0 mm) y, por tanto, nula también la lixiviación de nitratos (0 kg N/ha).

La figura 5 muestra de forma gráfica otros resultados de la optimización, en este caso para el tratamiento del Agricultor (3). Se representa la evolución de la cantidad total (kg N/ha) de nitratos en el suelo (0-100 cm), en comparación ahora con la evolución que se hubiera dado si se hubiese optimizado el riego a las fechas y dosis (total de 80 mm) indicadas.

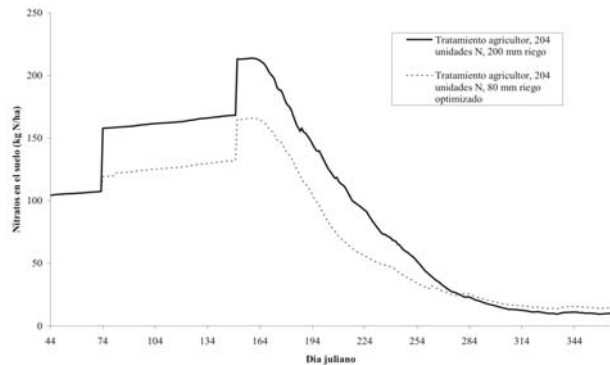


Fig. 5. Evolución temporal de la cantidad de nitrógeno en el suelo (kg N/ha) para el tratamiento del agricultor y para el de riego optimizado.

De estos ejemplos resulta que para el cultivo de remolacha estudiado ha habido un exceso de regadío de unos 120 mm y que, además, el riego efectuado no ha correspondido a los momentos de necesidad de la planta, ya que las fechas en las que se realizó el riego no corresponden a las propuestas por el modelo, que deduce los riegos a partir de un balance hídrico. Muy buena parte de ese exceso de regadío ha originado percolación al acuífero con el consiguiente lavado de nitratos del suelo y su aporte a las aguas subterráneas, sobre todo en el tratamiento del Agricultor, que es el de mayores dosis de abonado.

Finalmente, en la figura 6 se muestra la evolución del contenido en humedad del suelo (mm) según el modelo, para los dos horizontes considerados (0-40, 40-100 cm), y la misma evolución con los datos de humedad suministrados por el balance hídrico del suelo realizado para el horizonte 0-40 cm (Martínez *et al.*, 2003). También se ha representado el conjunto de lluvias y regadío (mm).

El ajuste para el horizonte más superficial es aceptable, excepción hecha de la parte inicial del periodo simulado, lo cual tiene que ver con las diferentes condiciones de partida, en lo que a humedad del suelo se refiere, consideradas por el modelo, por un lado, y por el balance, por otro. La evolución es coincidente en la mayor parte del periodo simulado, mostrando la influencia de las lluvias más importantes y, sobre todo, de los regadíos. El horizonte profundo muestra mayor humedad que el superficial, con incrementos de humedad en los momentos de superación de la capacidad de campo en el horizonte superficial. Es evidente la recarga producida por los riegos.

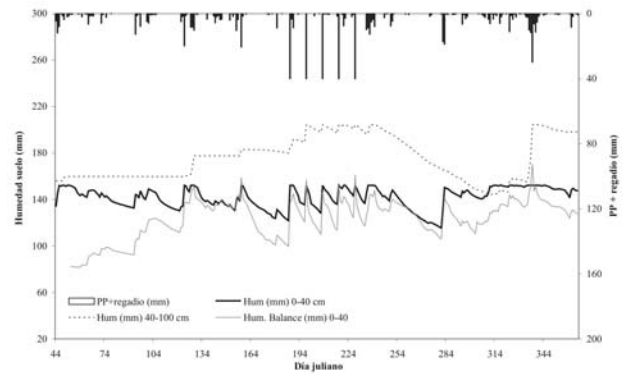


Fig. 6. Evolución diaria de la lluvia y el regadío (mm) y del contenido en humedad (mm), según STICS, en los dos horizontes (0-40, 40-100 cm) y según el balance hídrico del suelo (0-40 cm).

3. Discusión y conclusiones

El modelo STICS complementa los resultados derivados del tratamiento de los datos experimentales (Martínez *et al.*, 2003). Una gran ventaja de esta aplicación es que este modelo cuantifica aspectos que de otra manera no se podían haber cuantificado como el balance de nitrógeno (kg N/ha) en el suelo por tratamientos, incluyendo las cantidades estimadas tomadas por las plantas y la mineralización de la materia orgánica.

Por supuesto, el modelo también cuantifica el balance de agua del suelo a lo largo del periodo de cultivo. En este caso, estima una infiltración de 85 mm, bastante por debajo de los 207 mm deducidos del balance hídrico previamente realizado. La diferencia es debida a las distintas condiciones de humedad inicial establecidas para el suelo en el balance hídrico realizado con los datos experimentales y en el modelo, aspecto éste que se podría haber intentado corregir con una mayor profundización en el modelo, pero no era ese nuestro interés ahora. La evolución de humedad en el suelo después del inicio, según el modelo, se ajusta bastante bien a la del balance.

Lo realmente importante es que ambos métodos, balance hídrico y modelo STICS, coinciden en los momentos de episodios claros de infiltración, y, que en lo fundamental, son debidos a los excesos de agua en el riego del periodo julio-agosto, aparte de las fuertes lluvias de final del periodo.

El modelo hace un ajuste automático de riego según el cual, manteniendo prácticamente el mismo rendimiento de producción de remolacha (en torno a las 40 t/ha), y con los aportes de abono realmente aplicados, hubiera bastado con 80 mm de riego, en lugar de los 200 mm reales. Además, ese riego optimizado se tenía que haber dado en momentos diferentes a los realmente dados. Con esta optimización del riego, no se hubiera originado infiltración (0 mm) ni, por tanto, lixiviación de nitratos al acuífero.

Dicho de otra manera, según el modelo se regó por exceso y no en los momentos de mayor necesidad del cultivo. El excedente de riego originó un lavado de nitratos, entre otros elementos, del suelo. La evolución temporal de las concentraciones (mg NO₃⁻/l) en nitratos en las aguas de

infiltración estimadas por el modelo se ajustan muy bien a los datos experimentales de la parcela, con su disminución manifiesta después del verano, hasta valores inferiores a 20 mg NO₃/l, lo que hace más fiable los demás resultados del modelo.

Según el balance de nitrógeno (kg N/ha) en el suelo, por el modelo, las cantidades que se habrían lixiviado durante el periodo de cultivo oscilan entre 7 kg N/ha en las bandas Testigo y 15 kg N/ha en las del Agricultor, quedando todos los demás tratamientos en torno a 9 kg N/ha, sin prácticamente diferencias entre ellos. Respecto a la cantidad acumulada finalmente en las plantas sería de 173 kg N/ha en Testigo, 207-212 kg N/ha en Habitual y Urea (similar para Fisiostart y Umotart), y mayor, 258 kg N/ha, en Agricultor.

Es decir, incluso en el tratamiento de abonado 0 (Testigo) hay una acumulación importante de nitrógeno en la planta, debido a la notable reserva inicial existente en el suelo (104 kg N/ha). Esa reserva inicial junto con el abonado posterior, de fondo y de cobertera, diferente en kg N/ha para cada tratamiento, ha sido asimilada por la planta en una gran medida, de manera que al final del cultivo la cantidad que queda en el suelo es de 6-7 kg N/ha en todos los tratamientos, excepto en el caso del Agricultor que es mayor, 10 kg N/ha. Se deduce que el Agricultor aporta cantidades de nitrógeno mayores que las necesarias para el cultivo.

Un aspecto importante de este balance es la reserva inicial comentada (unos 104 kg N/ha), previa al cultivo de remolacha, debida al excedente dejado por el cultivo anterior (trigo) así como a su falta de lavado por las escasas lluvias del otoño-invierno anterior (2001-2002). En comparación a aquella situación, en la presente, al final del cultivo de remolacha, los excedentes en el suelo son muy bajos (del orden de 6-10 kg N/ha), debido a la acumulación por parte de la remolacha, que ha rentabilizado bien el nitrógeno aportado, y al lavado originado por el exceso de riego y por las fuertes lluvias de diciembre 2002 (Martínez *et al.*, 2003).

Agradecimientos. Esta investigación fue auspiciada por la Dirección de Aguas del Gobierno Vasco-Eusko Jaurlaritza, y se enmarca en un estudio más amplio sobre los trazadores, naturales y antrópicos, en diferentes sistemas hidrológicos (Proyecto REN2002-01705 del MCYT). Agradecemos a la Dra Marie Launay (INRA, Avignon, France) el habernos proporcionado los parámetros STICS de la remolacha azucarera.

Referencias

- Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.H., Ruget F., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Durr C., Nicoulaud B., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Machet J.M., Meynard J.M. y Delécolle R. (1998). STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. I. Theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18: 311-346
- Brisson N., Ruget F., Gate P., Lorgeou J., Nicoulaud B., Tayot X., Plenet D., Jeuffroy M.H., Bouthier A., Ripoche D., Mary B. y Justes E (2002). STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. II. Assessment by comparing with experimental reality for wheat and corn. *Agronomie*, 22:69-93
- Childs S.W., Gilley J.R. y Splinter W.E. (1977). A simplified model of corn growth under moisture stress. *Trans. ASAE*, 20: 858-865.
- Johnson A.K.L., Cramb R.A. (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., Kiniry J.R. (1986) CERES-Maize, A Simulation Model of Maize Growth and Developmen., *Texas A&M University Press*, College Station, TX.
- Lal H., Hoogenboom G., Calixte J.P., Jones J.W. y Beinroth F.H. (1993). Using crop simulations models and Gis for regional productivity analysis. *Trans. ASAE* 36: 175-184.
- Martínez M., García-Linares C., Sánchez.Pérez J.M., Aizpurua A., Ruiz de Loizaga I. y Antigüedad I. (2003). Lixiviación de nitratos bajo cultivo de remolacha en la Zona Vulnerable del acuífero Cuaternario de Vitoria-Gasteiz (País Vasco) *Estudio en la Zona no Saturada del Suelo. Vol. VI.* Este mismo volumen.
- Moen T.N., Kaiser H.M. y Riha S.J. (1994). Regional yield estimation using a crop simulation model: concepts, methods and validation. *Agric. Syst.* 46 : 79-92.
- Ritchie J.T., Otter S. (1984). Description and performance of CERES-Wheat, a user-oriented wheat yield model. *USDA-ARS-SR Grassland Soil and Water Research Laboratory*, Temple, TX, , pp. 159-175.
- Singh U., Thornton P.K. (1992). Using crop models for sustainability and environmental quality assessment. *Outlook Agric.* 21: 209-218.
- Stapper M. (1984). Simtag: A Simulation Model of Wheat Genotypae. Model Documentatio. *ICARDA Publication*, Aleppo, Syria.
- Van Keulen H., Seligman N.G. (1987) .Simulation of Water Use Nitrogen Nutrition and Growth of a Spring Wheat Crop. *Simulation Monograph*, Pudoc, Wageningen.
- Van Lanen H.A.J., Hacktenbroeke M.J.D., Bouma J. y Degroot W.J.M. (1992). A mixed qualitative quantitative physical land evaluation methodology. *Geoderma* 55: 37-54.
- 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., Bragg P.L., Porter J.R. y Rayner J.H. (1984). A winter wheat crop simulation model without water or nutrient limitations. *J. Agric. Sci.* 102: 371-382.