

*Utilización de un modelo simple de  
transporte de agua y nitrógeno en el suelo en  
las prácticas de Horticultura*  
*Using a simple model for water and nitrogen  
transport in soil in the practical works of  
Horticulture*

**A. Lidón, D. Ginestar, D. Gómez de Barreda**  
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA  
[alidon@qim.upv.es](mailto:alidon@qim.upv.es), [dginesta@mat.upv.es](mailto:dginesta@mat.upv.es), [diegode@btc.upv.es](mailto:diegode@btc.upv.es)

---

**Abstract**

*Los modelos de simulación del transporte de agua y nitrógeno en el suelo son herramientas útiles para evaluar distintas prácticas de cultivo sin necesidad de tener que esperar a que se complete el ciclo de crecimiento. En concreto, los modelos compartimentales sencillos para el agua y el nitrógeno en el suelo se basan en ecuaciones de balance de masa y en la resolución de un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias. Se plantea la posibilidad de utilizar este tipo de modelos en las prácticas de la asignatura Horticultura, evaluando distintos escenarios posibles de riego y abonado en un cultivo de coliflor. Los resultados muestran que distintas prácticas de cultivo producen diferencias en la lixiviación de nitrato y en la extracción de nitrógeno por el cultivo.*

*Simulation models for the transport of water and nitrogen in the soil are useful tools for evaluating the consequences of different crop management practices without waiting until the end of the crop cycle. Particularly, simple compartmental models for the transport of water and nitrogen are based on the solution of mass balance equations for the water and a system of ordinary differential equations for the nitrogen cycle. In this work, these models are used to evaluate different possible scenarios of irrigation and nitrogen fertilization in a cauliflower crop, as a practical work for the students of Horticulture course. The results show that different irrigation and fertilization strategies lead to different results for the nitrate leaching, water drainage and nitrogen uptake.*

---

Palabras clave: Modelos compartimentales, transporte de agua, lixiviación de nitrato, Horticultura  
Keywords: [Compartmental models](#), [water transport](#), [nitrate leaching](#), [Horticulture](#).

## 1. Introducción

La asignatura Horticultura se imparte en el cuarto curso (primer cuatrimestre) del Grado en Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural. Es una asignatura troncal para los alumnos que cursan la especialidad de Hortofruticultura y Jardinería y es continuista de otra asignatura denominada Cultivos Herbáceos que se imparte en tercer curso (segundo cuatrimestre) para todo el conjunto de los alumnos de la Titulación, y que es donde se establecen las bases de la horticultura.

El alumno que cursa Horticultura tiene unos conocimientos previos, muy recientes, sobre esta disciplina por lo que ya es capaz de analizar y discutir situaciones reales que se le plantean sobre el manejo del cultivo. La asignatura se divide en dos partes claramente diferenciadas. En el primer mes del curso, se refuerzan algunos aspectos generales que atañen al cultivo hortícola como son el uso de plásticos, la malherbología y la fertirrigación, para en el resto del cuatrimestre abordar cada uno de los cultivos hortícolas de manera específica. El profesor, durante la exposición de cada uno de los cultivos, incide de manera especial en el manejo de los mismos, donde el riego y la fertilización ocupan un lugar destacado. Al alumno se le da a conocer el impacto de estas prácticas agrarias, no solamente en lo que respecta a la necesaria nutrición de los cultivos hortícolas, sino en cuanto a su impacto en el medio ambiente, pues es bien conocido que el manejo de los fertilizantes y, en concreto, el de los abonos nitrogenados tiene efectos ambientales derivados. Así, la dosis aplicada, la forma química utilizada o el fraccionamiento, son aspectos que pueden originar emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, o pueden provocar junto a un manejo del riego inadecuado la lixiviación de nitrato que origina la contaminación del agua subterránea.

Además, esta asignatura es punto de control de 2 de las 13 competencias transversales establecidas en la Universitat Politècnica de València y que el alumno debe alcanzar al final del Grado: a) Responsabilidad ética, medioambiental y profesional y b) Pensamiento crítico. El uso del agua, los fertilizantes y los productos fitosanitarios en horticultura generan suficiente debate para desarrollar actividades encaminadas a evaluar ambas competencias transversales.

Para evaluar desde un punto de vista medioambiental las prácticas habituales de cultivo utilizadas por los agricultores en zonas de horticultura intensiva, es interesante conocer el comportamiento del agua y del nitrógeno en el suelo. Uno de los problemas asociados al manejo del riego y la fertilización en estas zonas, donde los aportes fertilizantes de nitrógeno son elevados y las eficiencias de riego no son muy buenas, es la lixiviación de nitrato, la cual puede originar problemas de contaminación en las aguas superficiales y subterráneas. Este es el caso de la Comunidad Valenciana; en la Figura 1 se muestran las zonas declaradas como vulnerables de acuerdo a la legislación vigente sobre protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos procedentes de fuentes agrarias (Directiva 91/676/CEE). Estas son, por tanto, las zonas con mayores problemas de contaminación por nitratos en las aguas subterráneas de la Comunidad Valenciana, y donde es preciso aplicar los Programas de Actuación que la legislación establece. Como se observa en la Figura 1, se trata de un problema que afecta a una extensión grande del territorio y que ha ido a más en los últimos años, ya que se han ido ampliando las zonas vulnerables con el paso del tiempo.

Se presenta en este trabajo un modelo compartimental sencillo (Contreras, 2009), (Lidón, 2013) que simula los principales flujos de agua y nitrógeno en el suelo y se propone su utilización en las prácticas de aula de la asignatura de Horticultura para evaluar casos reales de manejo del agua y de la fertilización en cultivos hortícolas al aire libre. Con ello, no sólo se pretende mejorar el aprendizaje de los alumnos sino generar un debate capaz de desarrollar las competencias transversales asignadas a esta asignatura. En particular, se propone su utilización en un cultivo

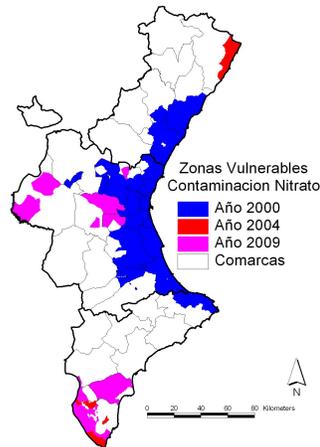


Figura 1: Zonas vulnerables a la contaminación por nitrato en la Comunidad Valenciana. (J. M. de Paz, <http://www.ivia.es/jmpaz/Mapas>).



Figura 2: Proceso de modelización de un cultivo.

de coliflor para sacar conclusiones sobre las consecuencias que tienen los distintos manejos simulando diferentes escenarios.

El proceso de utilización de un modelo de simulación para un cultivo (Cannavo, 2008) se esquematiza en la Figura 2. Se han de recoger una serie de datos sobre la climatología, las características del suelo, los riegos y la fertilización, que se utilizan como entradas a un modelo matemático que describe los principales procesos de transporte de agua y las distintas transformaciones asociadas al ciclo del carbono y nitrógeno en el suelo. El modelo matemático depende de numerosos parámetros que hace falta determinar. Esto se hace utilizando valores típicos de los parámetros atendiendo a las características del suelo y del cultivo y mediante un proceso de calibración del modelo que hace uso de medidas recogidas en la explotación a estudiar o en otra similar. Tras el proceso de calibración, se valida el modelo con las medidas disponibles, evaluando su capacidad de predicción. Una vez calibrado y validado el modelo para una zona concreta, ya es posible utilizar el modelo de simulación para evaluar la conveniencia de utilizar una prácticas agrícolas u otras.

## 2. Modelo de transporte de agua y nitrógeno en el suelo

Los modelos de transporte de agua y nitrógeno en el suelo generalmente constan de dos submodelos. Uno de los submodelos da cuenta de la dinámica del agua en el suelo y el otro de la del nitrógeno, contemplando todas las transformaciones en las que este elemento se ve envuelto en el suelo. Ambos submodelos están acoplados ya que la humedad del suelo interviene en la mayoría de procesos de transformación del nitrógeno, y la lixiviación de nitrato depende en gran medida del movimiento del agua en el suelo. Además, el ciclo del nitrógeno suele estar directamente relacionado con el ciclo del carbono, ya que la mayoría de los procesos en los que interviene la biomasa microbiana del suelo están regidas por la relación carbono-nitrógeno (C/N). Por ello, es preciso contemplar también el ciclo del carbono y sus transformaciones en el suelo.

Los modelos de simulación se clasifican según sus bases conceptuales y su grado de sofisticación. En general, son complejos y su utilización es difícil ya que requieren de un proceso de calibración que, en la mayoría de los casos es complicado por depender de un gran número de parámetros. Por ello, para realizar recomendaciones agrícolas donde no se requiere una gran precisión, es interesante disponer de modelos sencillos que dependan de un número pequeño de parámetros y permitan obtener una respuesta rápida. En este trabajo se presenta un modelo simplificado para el transporte y transformación del nitrógeno en el suelo acoplado con un modelo compartimental que da cuenta del balance de agua en el suelo (Contreras, 2009), (Lidon, 2013).

### 2.1. Modelo de transporte de agua

Para simular el transporte de agua en el suelo se utiliza un modelo compartimental (Lidon, 1999) que comprende una única capa de suelo de espesor  $z$ , en la que se establece un balance de masa según el esquema que se presenta en la Figura 3.

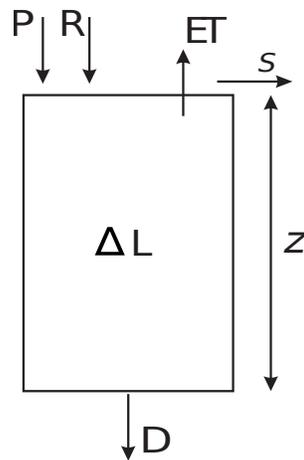


Figura 3: Balance de agua en el perfil de suelo.

En la columna de suelo y, para un determinado periodo de tiempo, se ha de cumplir la conservación de la masa de agua, dada por la relación

$$P + R = ET + S + D \pm \Delta L, \quad (1)$$

donde  $P$  (mm) es la contribución de la lluvia,  $R$  (mm) es el riego,  $ET$  (mm) es la evapotranspiración,  $S$  (mm) es la escorrentía,  $D$  (mm) es el drenaje y  $\Delta L$  es la variación de agua en el

suelo,

$$\Delta L = L_f - L_i,$$

obtenida como la diferencia entre la lámina final  $L_f$  (mm) y la lámina inicial  $L_i$  (mm) en el perfil.

El modelo de la dinámica del agua se establece calculando la lámina de agua en el suelo,  $L$ , y se basa en las siguientes suposiciones: hay una lámina máxima  $L_{max}$  (mm), una lámina máxima frente a la gravedad ("field capacity")  $L_{fc}$  (mm), y una lámina mínima,  $L_{min}$ , por debajo de la cual las plantas no pueden extraer agua.

El modelo establece un balance diario tomando como punto de partida la lámina calculada para el día anterior. Se tienen en cuenta los aportes por lluvia y riego en el día,  $AT = P + R$ .

Como pérdidas se tienen la evapotranspiración,  $ET$ , la escorrentía,  $S$  y el drenaje,  $D$ . La evapotranspiración potencial viene dada por

$$ET_{max} = k_p k_c E_0,$$

y la evapotranspiración se calcula mediante la siguiente expresión

$$ET_{act} = \begin{cases} ET_{max}, & L > L_{crit} \\ ET_{max} - 0.85ET_{max} \left( \frac{L_{crit} - L}{L_{crit} - L_{min}} \right), & L_{min} < L < L_{crit} \\ 0.15ET_{max}, & L < L_{min} \end{cases} \quad (2)$$

asumiendo que la  $ET_{act}$  disminuye linealmente cuando el agua del suelo disminuye desde una lámina crítica,  $L_{crit}$ , hasta el valor de la lámina mínima,  $L_{min}$ .

La lámina antes de las pérdidas es

$$L = L_{i-1} + AT - ET_{act}.$$

La escorrentía

$$S = \begin{cases} L - L_{max}, & L \geq L_{max} \\ 0, & L < L_{max} \end{cases} \quad (3)$$

El drenaje se calcula como

$$D = \begin{cases} L_{max} - L_{fc}, & L \geq L_{max} \\ L - L_{fc}, & L_{max} > L > L_{fc} \\ 0, & L_{fc} \geq L \geq L_{min} \\ L - L_{min}, & L < L_{min} \end{cases} \quad (4)$$

La lámina de agua al final del día es

$$L_f = \begin{cases} L_{min}, & L < L_{min} \\ L, & L_{fc} \geq L \geq L_{min} \\ L_{fc}, & L > L_{fc} \end{cases} \quad (5)$$

El modelo necesita pues determinar las constantes  $L_{max}$ ,  $L_{fc}$ ,  $L_{crit}$  y  $L_{min}$  para cada tipo de suelo (*calibrado del modelo*).

### 3. Modelo del nitrógeno

Para describir adecuadamente el ciclo del nitrógeno, se han considerado una serie de compartimentos que permiten contemplar los principales procesos en los que se ve envuelto el nitrógeno en el suelo (Porporato, 2003), (Wang, 2009), incluyendo las principales transformaciones y el transporte hacia capas más profundas. En particular, los ciclos del carbono y el nitrógeno que van acoplados, se modelan mediante tres compartimentos orgánicos (restos orgánicos, humus y biomasa microbiana, que se representan mediante los subíndices,  $l$ ,  $h$  y  $b$ , respectivamente). Además se consideran dos compartimentos que describen el nitrógeno mineral del suelo, es decir, el amonio y el nitrato, que se representan por  $N^+$  y  $N^-$ . En el ciclo del carbono se asume que la relación C/N en el humus y en la biomasa microbiana se mantienen prácticamente constante. Los procesos que se han considerado para estos compartimentos se muestran en la Figura 4.

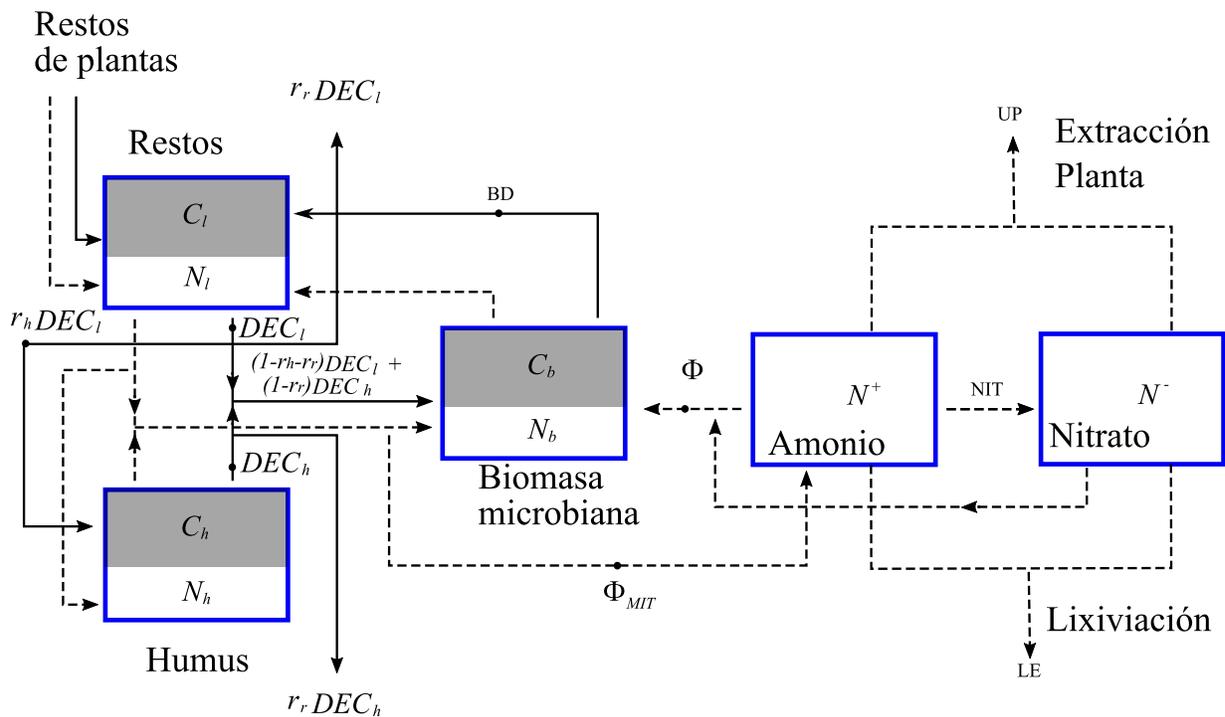


Figura 4: Compartimentos y ciclos de *carbono y nitrógeno* en el suelo.

En base a las relaciones entre compartimentos se establecen ecuaciones de balance para el carbono

$$\begin{aligned}
 \frac{dC_l}{dt} &= ADD + BD - DEC_l, \\
 \frac{dC_h}{dt} &= r_h DEC_l - DEC_h, \\
 \frac{dC_b}{dt} &= (1 - r_h - r_r) DEC_l + (1 - r_r) DEC_h - BD,
 \end{aligned} \tag{6}$$

y para el nitrógeno

$$\begin{aligned}\frac{dN_l}{dt} &= \frac{ADD}{(C/N)_{add}} + \frac{BD}{(C/N)_b} - \frac{DEC_l}{(C/N)_l}, \\ \frac{dN^+}{dt} &= MIN_{gross} - IMM_{gross}^+ - NIT - LE^+ - UP^+, \\ \frac{dN^-}{dt} &= NIT - IMM_{gross}^- - LE^- - UP^-.\end{aligned}\quad (7)$$

El significado de cada uno de los términos y más detalles sobre el modelo compartimental se pueden consultar en (Porporato, 2003) y (Contreras, 2009).

El sistema de ecuaciones diferenciales dado por (6) y (7) se discretiza para la variable temporal utilizando el método de Euler explícito. Este método es un método de primer orden en el paso de tiempo ( $O(\Delta t)$ ) pero, como las soluciones del problema son funciones que cambian de forma suave con el tiempo, un esquema de este tipo es suficiente para resolver el problema (Contreras, 2009).

El sistema acoplado formado por el submodelo del agua y el del nitrógeno se ha implementado en un programa de Matlab que lee el valor de los parámetros del modelo y las variables de entrada, como riego, lluvia y fertilización, de una hoja Excel, que es la que debe modificar el usuario del programa para adaptarlo a la simulación que quiera realizar. Los resultados se obtienen en otra hoja Excel, lo que facilita la representación gráfica de los resultados y el manejo de los mismos por parte de los alumnos <sup>1</sup>.

## 4. Casos de estudio

A modo de ejemplo de aplicación del programa en la asignatura de Horticultura, se han simulado diferentes casos de manejo del riego y de la fertilización en un cultivo de coliflor de la zona de la huerta de Valencia.

### 4.1. Descripción del cultivo

Los datos que se utilizan para las distintas simulaciones corresponden a un experimento de fertilización llevado a cabo en una parcela comercial situada en Paterna (Valencia), tal y como se muestra en la Figura 5. El suelo de la parcela es profundo, sin piedras, de textura franco arcillosa en las dos primeras capas (0-15 y 15-30 cm) y arcillo-limosa en la tercera capa considerada en el ensayo (30-45 cm). La materia orgánica varía entre 35 g kg<sup>-1</sup> en la capa superficial y 16 g kg<sup>-1</sup> en las capas más profundas. La densidad aparente del suelo osciló entre 1128 kg m<sup>-3</sup> en la primera capa y 1600 kg m<sup>-3</sup> en la tercera capa. La fecha de plantación fue el 16 de septiembre de 2013 y la cosecha se realizó el 15 de febrero de 2014. El período de simulación abarcaba desde unos días antes de la plantación del cultivo de coliflor, hasta el comienzo del siguiente cultivo, a primeros de mayo de 2014. El riego de la parcela es por inundación, con agua proveniente de acequia, utilizando surcos y la fertilización se hizo con un abonado de cobertera realizado a mitad de octubre de 100 kg N/ha con sulfato amónico. Antes de la plantación, en el mes de julio, se realizó una enmienda orgánica con gallinaza a razón de 27.6 t ha<sup>-1</sup> (materia fresca).

<sup>1</sup>El programa y el fichero de entrada están disponibles solicitándolos a la dirección de correo [alidon@qim.upv.es](mailto:alidon@qim.upv.es)



Figura 5: Detalle del cultivo de coliflor en la parcela de Paterna (Valencia).

#### 4.2. Escenarios contemplados

Se propone como práctica de la asignatura de Horticultura realizar distintas simulaciones que contemplen modificaciones en el riego y la fertilización, respecto a un caso base consistente en la práctica habitual del agricultor, para discutir los resultados obtenidos en las distintas alternativas y poder hacer alguna recomendación sobre el manejo del agua y la fertilización en el cultivo de coliflor que suponga un menor impacto ambiental. En cada caso se analiza la evolución de la lámina de agua, el drenaje, la lixiviación de nitrato y la extracción de nitrógeno por el cultivo.

##### Manejo del riego

En cuanto al manejo del riego se analizará un primer caso (Caso 1) que corresponde a la práctica habitual del agricultor consistente en aplicar los riegos mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1: Riegos aplicados en la parcela de coliflor.

Fecha	Lámina (mm)
02-09-13	146.0
16-09-13	110.3
23-09-13	61.7
07-10-13	77.0
28-10-13	99.1
11-11-13	67.3
25-11-13	67.8
06-01-14	89.6
03-02-14	93.5
14-04-14	151.0

La mayoría de los riegos oscilan entre 70 y 90 mm excepto los riegos inicial y de plantación que aportan láminas superiores a 110 mm. Un segundo caso considerado (Caso 2) consiste en la reducción de las láminas aplicadas en estos dos primeros riegos. En concreto, se propone una reducción del 50 % en el primer riego y del 25 % en el segundo riego.

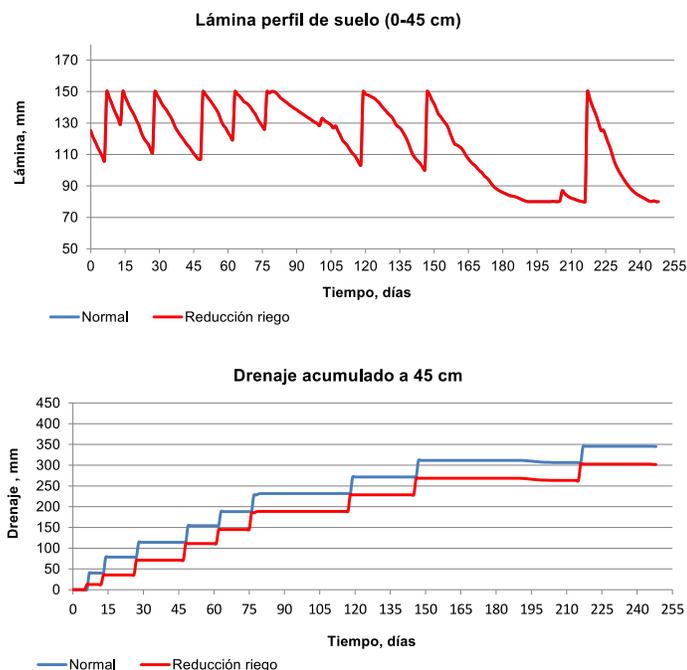


Figura 6: Lámina de agua en el perfil y drenaje acumulado según el manejo de riego realizado.

### Manejo de la fertilización nitrogenada de cobertera

Como se ha indicado anteriormente, la fertilización nitrogenada que se realiza en esta parcela consiste en un abonado orgánico a base de gallinaza aplicada en el mes de julio y un abonado de cobertera a base de sulfato amónico realizado aproximadamente al mes de la plantación. Considerando como habitual esta práctica, se propone evaluar el efecto de la dosis, el número de aplicaciones y la forma química del abono. Para la dosis se considera un abonado de  $100 \text{ kg N ha}^{-1}$  y otro de  $50 \text{ kg N ha}^{-1}$ , manteniendo el riego del Caso 1.

Para evaluar la influencia del fraccionamiento se ha comparado una aplicación de  $100 \text{ kg N ha}^{-1}$  frente a dos aplicaciones de  $50 \text{ kg N ha}^{-1}$ . Por último, se compara el uso de dos formas químicas de nitrógeno, la habitual a base de sulfato amónico, y la otra utilizando una forma mixta (nitrato amónico).

## 5. Resultados obtenidos en las simulaciones

### 5.1. Resultados del manejo del agua

Puesto que el transporte de nitrógeno en el suelo hacia capas más profundas depende en parte del drenaje de agua, se decidió estudiar la influencia del riego sobre la lixiviación de nitrato. Analizando los riegos efectuados por el agricultor, se observó que la lámina aplicada en los dos primeros riegos, coincidiendo con la plantación del cultivo, era muy alta, por lo que se decidió reducirla en un 50% en el primer riego y un 25% en el segundo. Los resultados obtenidos muestran que no hubo variación en la lámina de agua a lo largo de la simulación pero si en el drenaje (Figura 6), el cual se redujo en un 12%, sin afectar ello a la transpiración del cultivo.

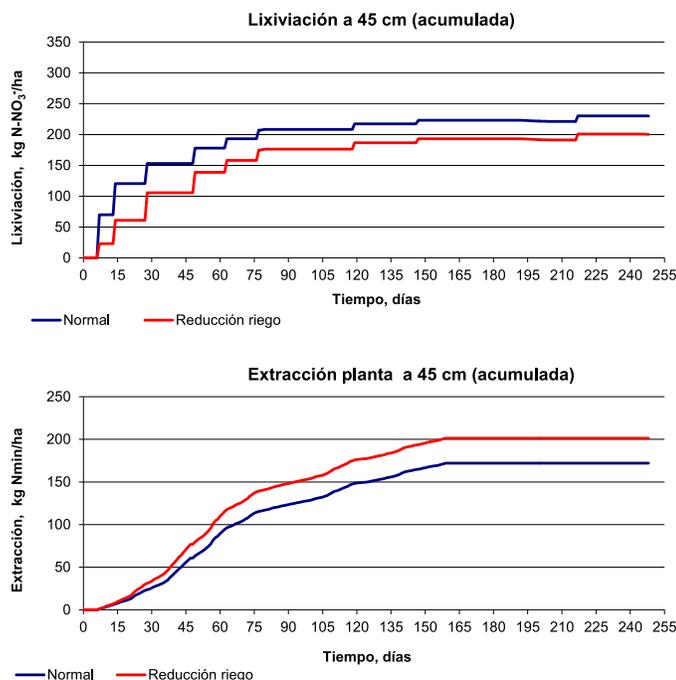


Figura 7: Lixiviación de nitrato y extracción de N por la planta según el manejo de riego realizado.

El menor drenaje de agua debido a la reducción de los dos primeros riegos supone una menor lixiviación de nitrato por debajo de los primeros 45 cm de suelo y una mayor extracción de nitrógeno por el cultivo, tal y como se muestra en la Figura 7. Las pérdidas de nitrato se redujeron en  $30 \text{ kg N ha}^{-1}$ , que quedaron disponibles en el perfil superior de suelo y pudieron ser extraídos por el cultivo. Estos resultados muestran que sería conveniente realizar un mejor manejo del riego, reduciendo las láminas aplicadas en los riegos de plantación, puesto que con ello se reducen las pérdidas por lixiviación y se mejora la eficiencia en el uso de nitrógeno por la planta.

## 5.2. Resultados del manejo de la fertilización

Para evaluar el manejo de la fertilización nitrogenada se realizaron modificaciones en la dosis de nitrógeno aplicado en el abonado de cobertera, en el fraccionamiento de ésta y en la forma química utilizada, manteniendo en estos casos el riego aplicado por el agricultor. La reducción de la dosis aplicada produjo una menor extracción de nitrógeno por el cultivo, sin apenas variación de la lixiviación de nitrato (Figura 8), siendo el nitrógeno residual, es decir, el que queda en el perfil de suelo al final del cultivo, similar en ambos casos.

El fraccionamiento del abonado de cobertera de  $100 \text{ kg N ha}^{-1}$  en dos aplicaciones (octubre y noviembre) apenas produjo variaciones en ninguna de las variables estudiadas, tal y como se muestra en la Figura 9, luego en las condiciones de este ensayo, es preferible realizar un único aporte de N puesto que así el coste de la operación de abonado es menor para el agricultor.

La utilización de una forma química a base de amonio frente a una forma nítrico-amoniacoal provoca una menor lixiviación de nitrato (unos  $14 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) y una mayor extracción por el cultivo (Figura 10), sin apenas variación en el contenido residual de nitrógeno en el suelo. Por ello, en la situación estudiada, la utilización de una forma únicamente a base de amonio supone una forma más eficiente del nitrógeno.

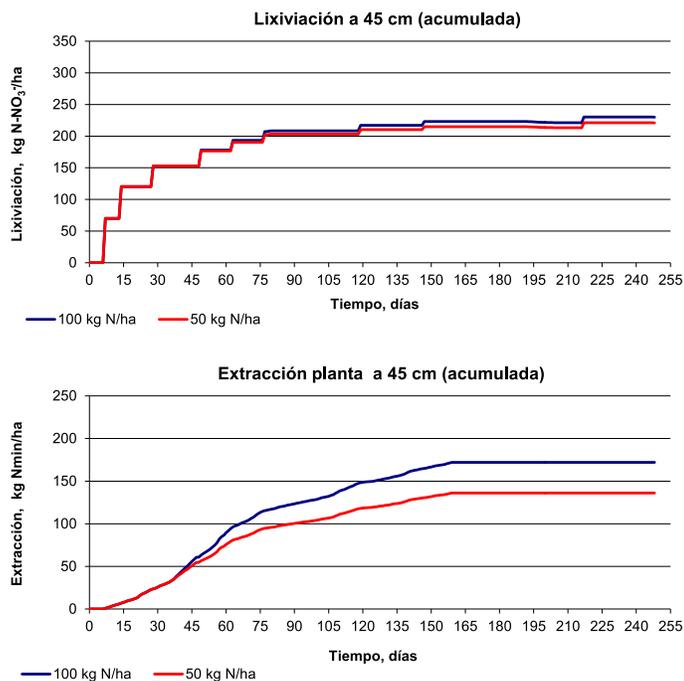


Figura 8: Lixiviación de nitrato y extracción de N por la planta según la dosis de abonado utilizada.

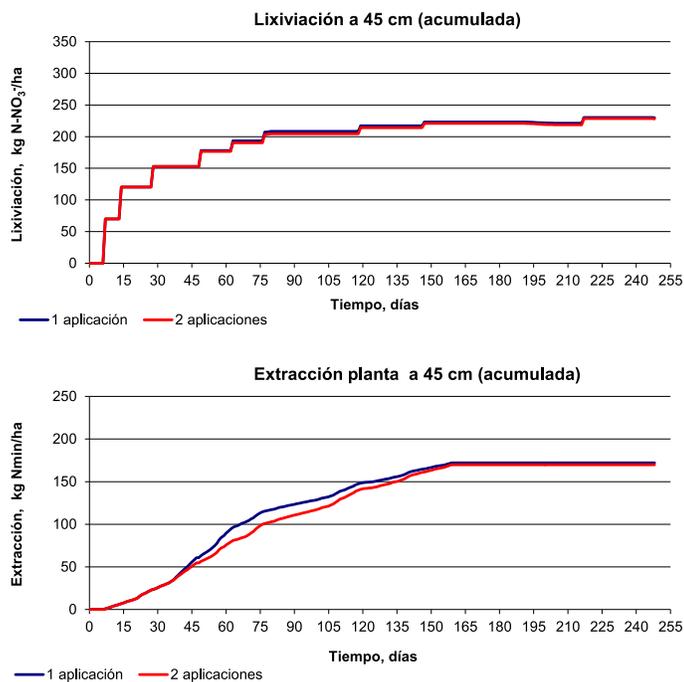


Figura 9: Lixiviación de nitrato y extracción de N por la planta según el número de aplicaciones.

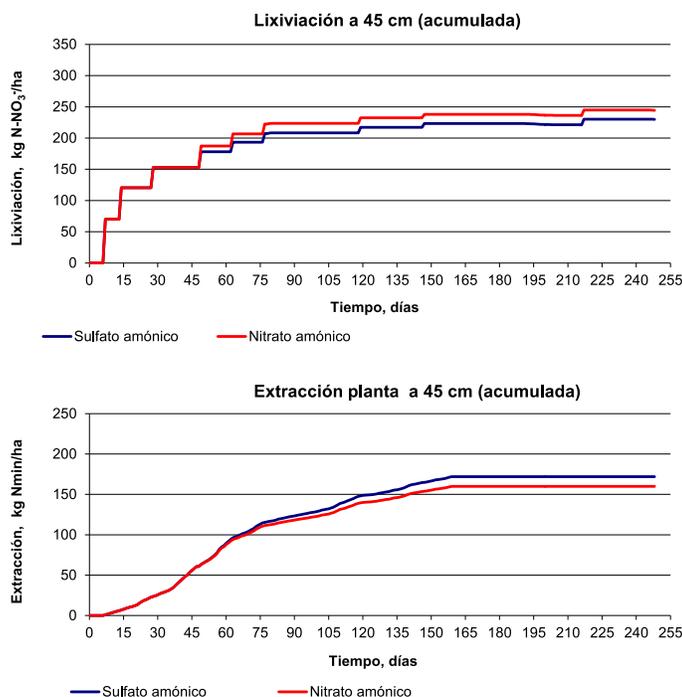


Figura 10: Lixiviación de nitrato y extracción de N por la planta según la forma química utilizada.

## 6. Conclusiones

Los modelos de transporte de agua y nitrógeno son útiles para evaluar los efectos agronómicos y sobre el medio ambiente de las distintas prácticas de cultivo (riego y fertilización) sin necesidad de hacer muestreos y de esperar a los resultados del cultivo.

Los modelos sencillos se pueden introducir en las prácticas de Horticultura y permiten discutir la conveniencia de determinados riegos y abonados, desde el punto de vista agronómico y medioambiental. En este trabajo se ha mostrado un ejemplo de uso de modelos de simulación para evaluar distintas alternativas de manejo en un cultivo de coliflor típico de la huerta de Valencia, que podría hacerse extensivo a la rotación de cultivos típica de esta zona. Se ha puesto de manifiesto que la disminución de los riegos iniciales de plantación reducen la lixiviación de nitratos sin afectar a la extracción de nitrógeno del cultivo. Por otra parte, la reducción de la dosis de abonado de cobertura, no es recomendable en ensayo que se simula porque se ve afectada la extracción de nitrógeno por el cultivo. Así mismo, el fraccionamiento del abonado de cobertura no produjo cambios ni en la lixiviación ni en la extracción, sin embargo, es recomendable utilizar la forma amónica, ya que produce menos lixiviación.

## Referencias

-  Contreras W. A., Lidón A. L., Ginestar D., Bru R. (2009).  
*Compartmental model for nitrogen dynamics in citrus orchards.*  
Mathematical and Computer Modelling, 50, 794–805.
-  Lidón A., Ramos C., Ginestar D., Contreras W.(2013).  
*Assessment of LEACHN and a simple compartmental model to simulate nitrogen dynamics in citrus orchards.*  
Agricultural water management, 121, 42–53.
-  Cannavo P., Recous S., Parnaudeau V., Reau R. (2008).  
*Modeling N dynamics to assess environmental impacts of cropped soils.*  
Advances in Agronomy 97, 131–174.
-  Lidón A., Ramos C., Rodrigo A. (1999).  
*Comparison of drainage estimation methods in irrigated citrus orchards.*  
Irrig. Sci. 19, 25–36.
-  Porporato A., D’Odorico P., Laio F., Rodríguez-Iturbe I. (2003).  
*Hydrologic control on soil carbon and nitrogen cycles. I.*  
Modeling scheme, Adv. Water Resour.26 (1), 45–58.
-  Wang L., D’Odorico P., Manzoni Sorato A., Macko S. (2009).  
*Soil carbon and nitrogen dynamics in southern African savannas:  
the effect of vegetation-induced patch-scale  
heterogeneities and large scale rainfall gradients.*  
Climatic Change, 94, 63–76.

Modelling in Science Education and Learning  
<http://polipapers.upv.es/index.php/MSEL>