

# Reducción de la lixiviación de nitratos y manejo mejorado de nitrógeno con sondas de succión en cultivos hortícolas

María Rosa Granados García

Rodney B. Thompson

María Dolores Fernández Fernández

Juan Carlos Gázquez Garrido

María Luisa Gallardo Pino

Carolina Martínez-Gaitán



# Reducción de la lixiviación de nitratos y manejo mejorado de nitrógeno con sondas de succión en cultivos hortícolas

María Rosa Granados García

Rodney B. Thompson

María Dolores Fernández Fernández

Juan Carlos Gázquez Garrido

María Luisa Gallardo Pino

Carolina Martínez-Gaitán



**REDUCCIÓN DE LA LIXIVACIÓN DE NITRATOS Y MANEJO MEJORADO DE  
NITROGENO CON SONDAS DE SUCCIÓN EN CULTIVOS HORTÍCOLAS**

© Fundación Cajamar

**Autores:** M.R. Granados, R.B. Thompson, M.D. Fernández, J.C. Gázquez, M.L. Gallardo, C. Martínez-Gaitán

**Edita:** Fundación Cajamar

**Imprime:** Escobar Impresores, S.L. - El Ejido (Almería)

**Depósito legal:** AL-2311-2007

# Índice

El problema de los nitratos en la agricultura .....	5
Legislación vigente sobre nitratos en la agricultura .....	6
Contaminación de acuíferos por nitratos en Almería.....	8
Prácticas de manejo relacionadas con la lixiviación de nitratos desde cultivos hortícolas en Almería .....	10
Manejo de los cultivos para reducir las pérdidas de nitratos por lixiviación .....	11
Monitorización de la concentración de nitratos en la solución del suelo durante el cultivo mediante sondas de succión .....	13
Casos prácticos de manejo de la fertilización nitrogenada de cultivos con sondas de succión .....	15
Resultados respecto al volumen de agua aportado y drenado.....	16
Resultados respecto a la concentración de nitratos en la solución de suelo .....	17
Resultados respecto al aporte (fertilización) y lixiviación de Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) .....	17
Discusión .....	20
Conclusiones .....	21
Agradecimientos.....	21
Referencias .....	21
ANEXO.....	23



## El problema de los nitratos en la agricultura

El nitrógeno (N) es el nutriente añadido en mayor cantidad a los cultivos. Sin el aporte de N fertilizante, los altos niveles productivos en la producción moderna de cultivos no serían posibles, con lo cual no se podría alimentar a la actual población mundial de 6.000 millones de habitantes. Generalmente, sólo un 20-50% de N mineral aportado a un cultivo es recuperado por las plantas, y gran parte del N no recuperado por el cultivo se pierde al medioambiente. Esta es una característica básica y un problema de la agricultura moderna en todo el mundo. Las pérdidas de N no pueden ser eliminadas por completo, sin embargo, pueden ser reducidas de forma importante. Uno de los objetivos de la agricultura moderna es el de mantener una elevada producción agrícola de gran calidad, reduciendo el impacto ambiental, como es la pérdida de grandes cantidades de N hacia el medioambiente.

En sistemas hortícolas intensivos como en Almería, la pérdida más importante de N al medioambiente es por lixiviación de nitratos, que son los nitratos que no son aprovechados por el cultivo y que pueden ser arrastrados por el agua de riego en profundidad, y que por tanto, tienen el potencial de llegar a acuíferos superficiales. De hecho, los nitratos lixiviados desde los cultivos son la mayor fuente de contaminación por nitratos de los acuíferos, y es un problema a nivel mundial. Sin embargo, para que exista lixiviación de nitratos es necesario que se produzcan simultáneamente un exceso de nitratos en el suelo y un exceso de agua.

En muchas zonas, el agua para consumo humano procede de los acuíferos. La principal preocupación de la contaminación por nitratos de los acuíferos está relacionada con problemas para la salud y el medioambiente. El problema más grave para la salud es la metahemoglobinemia o 'síndrome de los bebés azules'. El nitrato puede ser reducido a nitrito en la saliva y jugos gástricos de los bebés. Este nitrito tiene el poder de reducir la capacidad de la sangre para transportar oxígeno provocando asfixia, la cual puede causar daño cerebral o la muerte en bebés. Los límites de concentración de nitratos en aguas de consumo humano se han establecido basándose en este riesgo. La Unión Europea (UE) ha adoptado un límite de nitrato de  $50 \text{ mg NO}_3^- \text{ L}^{-1}$  y de nitrito de  $0.5 \text{ mg NO}_2^- \text{ L}^{-1}$  para este tipo de aguas.

El principal problema medioambiental causado por los nitratos es la eutrofización. El nitrato de los acuíferos puede llegar a los ríos, estuarios y aguas costeras, provocando

un crecimiento rápido en algunas especies que pueden provocar grandes cambios en la composición de poblaciones naturales. Con la muerte y descomposición de la biomasa producida, puede haber una disminución importante del oxígeno disponible en los sistemas acuáticos, que puede causar la muerte de plantas acuáticas y peces.

## Legislación vigente sobre nitratos en la agricultura

A consecuencia de la contaminación de acuíferos por nitratos de origen agrario y los problemas que pueden causar esta contaminación sobre la salud humana y el medioambiente, se ha desarrollado legislación encaminada a la reducción de esta contaminación. Una revisión completa de la legislación relevante en el contexto de Almería ha sido preparada por FIAPA (García y Alonso, 2006).

Todos los países de la UE están obligados a implementar la Directiva de Nitratos (EC, 1991). Esta legislación europea requiere que los estados miembros de la UE:

- (i) declaren las zonas afectadas como 'zonas vulnerables a la contaminación por nitratos' (ZVN),
- (ii) desarrollen 'Planes de Acción' en estas zonas afectadas para reducir la contaminación por nitratos, y
- (iii) evalúen regularmente la efectividad de estos 'Planes de Acción'.

A nivel estatal, España adoptó esta directiva mediante el Real Decreto 261/1996 (Anon., 1996), sobre protección de la contaminación de aguas por nitratos de origen agrario. En Andalucía, el Decreto 261/1998 (Anon., 1999) estableció seis zonas 'vulnerables a la contaminación por nitratos'. Recientemente, en el Decreto 36/2008, se ha revisado la declaración de zonas vulnerables en la comunidad andaluza, aumentando hasta veintidos el total de zonas afectadas en esta región (figura 1). Tres de estas zonas corresponden a las tres zonas donde existe la mayor concentración de invernaderos de Almería: Campo de Dalías (zona 12), Bajo Andarax (zona 13) y Campo de Níjar (zona 14). Prácticamente la totalidad de la zona de producción hortícola bajo plástico de Almería ha sido declarada como ZVN, y está llamada a adoptar Planes de Acción encaminados a reducir la contaminación por nitratos de los acuíferos.

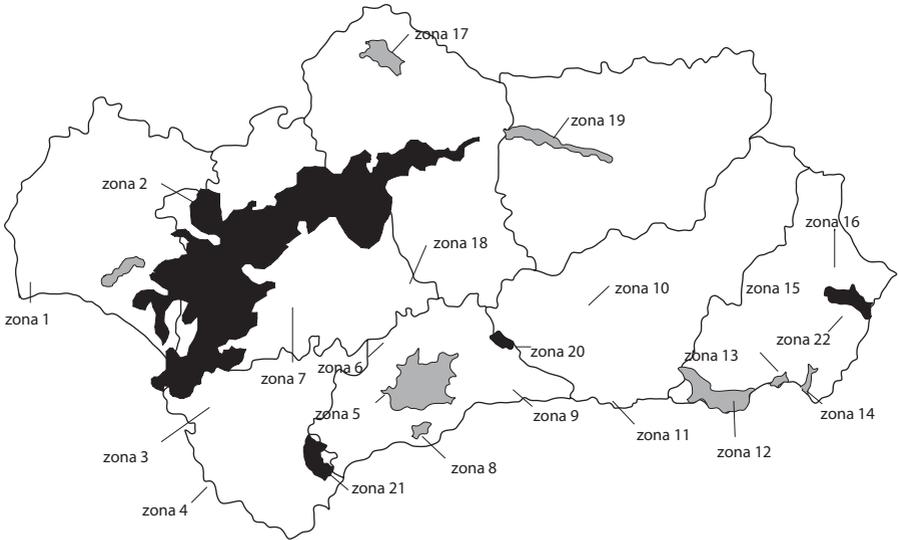


Figura 1. Designación de zonas vulnerables a la contaminación por nitratos en Andalucía del Decreto 36/2008 (Anon., 2008).

Las características generales de los Planes de Acción son:

1. El aporte de N fertilizante tiene que considerar:
  - (a) la demanda de N del cultivo
  - (b) el N mineral presente en el suelo al inicio del cultivo
  - (c) el N mineralizado procedente del aporte de estiércol
  - (d) el N mineralizado procedente de la material orgánica del suelo
2. Límites máximos de la cantidad de N que se pueden aplicar a un cultivo
3. El aporte de estiércol NO PUEDE suponer un aporte superior a  $170 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  (un aporte típico de  $3,7 \text{ kg m}^{-2}$  con una humedad del 35% y un 1,7% de riqueza, aporta  $400 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ )

Actualmente (Mayo 2008), el gobierno andaluz está preparando un nuevo decreto sobre los 'Planes de Acción' que deben aplicarse en las zonas declaradas vulnerables a la contaminación por nitratos. En este nuevo decreto, además de las recomendaciones anteriores, se exigirá que todas las cantidades de fertilizantes nitrógenados aplicadas a un cultivo deben ser recogidas en un libro de control, siendo obligatorio guardar todos los recibos de compra de fertilizantes nitrogenados, y también se establecen inspecciones para la revisión de su cumplimiento.

Toda la legislación europea sobre nitratos se ha incorporado en otras directivas o se tendrán en cuenta para mantener las ayudas de la PAC. De hecho en 2005, la UE revisó la Política Agraria Común (PAC), como consecuencia las ayudas de este programa se aplicarán en función del cumplimiento de la Directiva Europea de Nitratos, especialmente en materia de protección al medioambiente. Además, la Directiva Marco Europea del Agua 2000/60/CE (EC, 2000), que se aprobó en el año 2000 con el objetivo de alcanzar y mantener una buena calidad ecológica de las aguas subterráneas y superficiales para el año 2015, incorpora la Directiva Europea de Nitratos. Por tanto, existe la obligación para que los acuíferos no estén contaminados con nitratos en esta fecha.

## Contaminación de acuíferos por nitratos en Almería

El sistema de acuíferos del Campo de Dalías, donde se encuentra el 80% de los invernaderos de Almería, está formado por un acuífero superficial, bajo el cual se localizan dos grandes acuíferos subterráneos. Estos acuíferos más profundos son la fuente principal del agua de riego para la agricultura de la zona. El acuífero superficial recibe la mayor parte del drenaje producido en los invernaderos (Pulido, 2000).

El rápido desarrollo de la superficie de invernaderos en los años 80, se ha producido en paralelo a la contaminación por nitratos del acuífero superficial del Campo de Dalías. La tendencia general ha sido el aumento en la concentración de nitratos en el acuífero superior en los últimos años (Figura 2). En la zona del Campo de Dalías hay una superficie importante con concentraciones muy superiores al límite máximo establecido por la unión europea en  $50 \text{ mg NO}_3^- \text{ L}^{-1}$  ( $0,8 \text{ mmol NO}_3^- \text{ L}^{-1}$ ; Figura 3), superando hasta cinco veces este límite en las zonas más contaminadas.

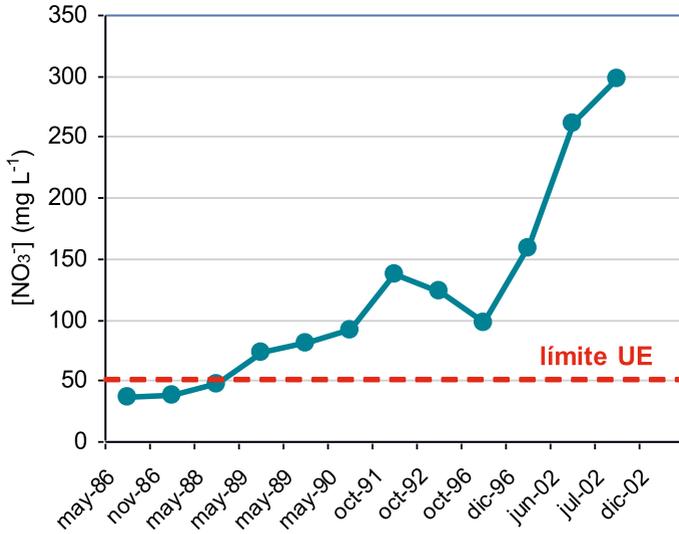


Figura 2. Concentración de nitratos en el sondeo 518 del acuífero superficial 'Balerna-Las Negras' (Cajamar, 2005).

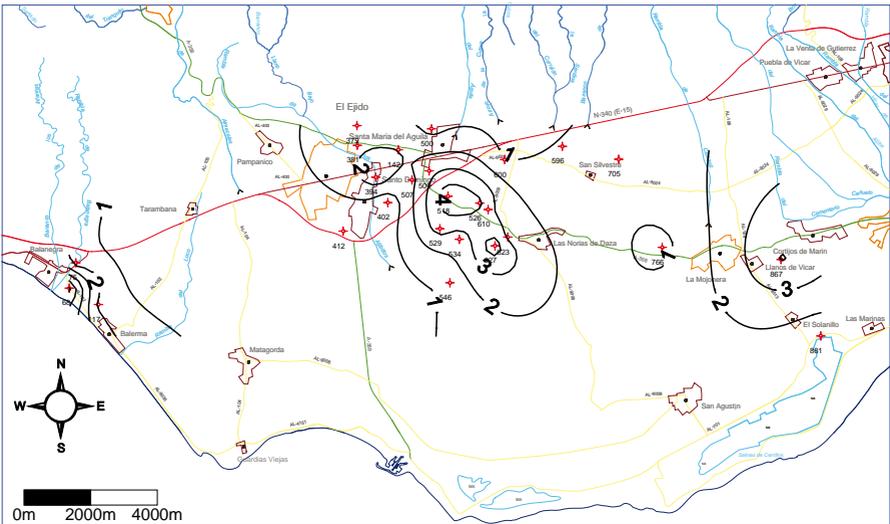


Figura 3. Mapa de isovalores de concentración de nitratos mmol NO<sub>3</sub><sup>-</sup> L<sup>-1</sup> en el acuífero superficial del Campo de Dalías (Cajamar, 2005).

## Prácticas de manejo relacionadas con la lixiviación de nitratos desde cultivos hortícolas en Almería

La Estación Experimental de la Fundación Cajamar y la Universidad de Almería han desarrollado varios proyectos para identificar las prácticas de manejo locales que pueden causar la pérdida o lixiviación del nitrato aportado a los cultivos, y la consecuente contaminación del acuífero asociado a este sistema. Es conveniente considerar los cultivos desarrollados en suelo y sustratos por separado.

Aproximadamente el 20% de los cultivos de invernadero de Almería se desarrollan en sustrato, casi su totalidad son 'sistemas abiertos'. En estos sistemas abiertos el uso de fracciones de drenaje del 20-30% pueden producir una apreciable lixiviación de nitratos. Sin embargo, los sistemas con recirculación presentan pérdidas de nitratos por lixiviación muy pequeñas.

El manejo local de los cultivos en suelo han sido caracterizados en varias encuestas realizadas en invernaderos comerciales (Pérez-Parra y Céspedes, 2001; Fernández et al., 2007; Thompson et al., 2007). Estas encuestas sugieren un número de prácticas que pueden contribuir a pérdidas de nitratos de cultivos desarrollados en suelo. Estas prácticas pueden dividirse en prácticas de riego y prácticas de abonado, ya que ambos, el riego y el manejo de N afectan a la lixiviación de nitratos.

Las prácticas de riego que pueden contribuir a la lixiviación de nitratos son:

- > Riegos elevados aplicados para desinfección química del suelo, previo al transplante y para lavar sales.
- > Riegos superiores a las necesidades hídricas durante las primeras semanas del cultivo después del transplante para asegurar la supervivencia de las plántulas.

Las prácticas de abonado que pueden contribuir a la lixiviación de nitratos son:

- > Uso de esquema de abonado fijo para cada cultivo, con modificaciones en función del estado de desarrollo del cultivo y de las condiciones climáticas.
- > Poca consideración de otras fuentes de N, como aplicaciones anteriores de estiércol, o del N presente en el suelo.
- > Aplicaciones de grandes cantidades de estiércol, que comunmente aportan 400 kg N/año o más.

## Manejo de los cultivos para reducir las pérdidas de nitratos por lixiviación

El uso cada vez más frecuente de programadores de riego y tanques múltiples en los invernaderos de Almería (Fotografía 1) con cultivos en suelo, proporcionan la posibilidad de controlar el aporte de nitrógeno al cultivo, adaptándolo a la demanda del mismo. Con estos sistemas, los agricultores tienen la capacidad técnica para aportar agua y nutrientes a requerimiento de la planta. El manejo óptimo de ambos, riego y N, es necesario para reducir las pérdidas de nitratos por lixiviación.

### Manejo del Riego

Existen herramientas para el manejo eficiente del riego durante un cultivo. El programa PrHo (<http://www.fundacioncajamar.es/estacion/agrdatos/default.htm>), puede ser utilizado para calcular un plan de riego según la demanda del cultivo, además las medidas realizadas con tensiómetros pueden utilizarse para ajustar los volúmenes de riego a aportar. Como guía general, manteniendo el potencial mátrico del suelo entre 10 y 30 cbares en suelos de textura ligera y entre 15 y 40 cbares en suelos de textura más pesada, asegurará un crecimiento óptimo y reducirá las pérdidas de drenaje. El uso combinado de un programa (PrHo) y un método de monitorización (tensiómetros) es un ejemplo de manejo prescriptivo-correctivo. El manejo prescriptivo es un manejo basado en una planificación previa, y el manejo correctivo es el uso de la monitorización para ajustar el manejo de un insumo.

En relación a los grandes volúmenes de agua de riego asociados a la desinfección química de suelo y el riego de pre-transplante, la reducción de estos riegos a un volumen mínimo efectivo y la reducción de grandes cantidades de nitrato en el suelo, procedente del abonado excesivo de cultivos anteriores, podrán reducir la cantidad de nitratos perdida por lixiviación durante esta fase.

### Manejo de Estiércol

El estiércol se aporta al suelo de los invernaderos de Almería para aumentar el contenido de materia orgánica, y mejorar las propiedades físicas del suelo. Normalmente, durante la construcción del invernadero se realizan grandes aportes de estiércol, además se realizan retranqueos y "carillas" con aporte de estiércol de forma periódica.

Las cantidades de estiércol aplicadas, en la mayoría de los casos aportan en general mucho más N que el límite impuesto por la UE y la legislación estatal y andaluza (170 kg N/ha). En este momento no está claro si este límite será aplicado a los aportes de compost. La limitación impuesta por la normativa a los aportes de estiércol, hace necesario que se identifiquen otras prácticas que puedan contribuir a mejorar las características físicas de estos suelos.

## Manejo de Nitrógeno

El manejo prescriptivo-correctivo también puede ser aplicado a la fertilización. El manejo prescriptivo de N consiste en la estimación de las necesidades de N de un cultivo. Estudios experimentales han desarrollado programas informáticos que pueden ser utilizados para calcular las cantidades de N a aportar diariamente. Sin embargo, estos programas no están disponibles comercialmente.

Para el manejo correctivo del N existen varios modos de monitorización. Entre ellos está el análisis de savia, análisis de clorofila, determinación del contenido de N de un cultivo, y el análisis de la concentración de nitratos en la solución del suelo. El análisis de nitratos en la solución del suelo de invernaderos de Almería ha demostrado ser un método efectivo y de fácil aplicación, por lo cual se describirá a continuación.



Fotografía 1. Tanques para solución nutritiva concentrada (a), programador de riego (b) y tanque de  $\text{HNO}_3$  para regulación de pH (c).

## Monitorización de la concentración de nitratos en la solución del suelo durante el cultivo mediante sondas de succión

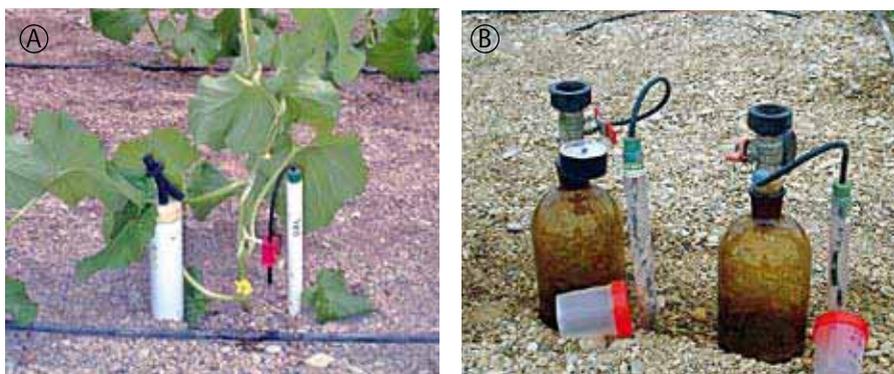
Las sondas de succión son una herramienta efectiva para monitorizar el N disponible en el suelo, ya que esta medida puede considerar las grandes diferencias que existen entre los suelos, en cuanto al tipo de suelo, edad, historial de aporte de estiércol y manejo previo de N. Las sondas de succión consisten en un tubo con una cápsula cerámica a través de la cual la solución de agua del suelo entra al aplicar un vacío (Fotografía 2). Una vez extraída la solución del suelo de la sonda, el análisis químico nos indicará la concentración de nitrato que está disponible para el cultivo en ese momento determinado.

Estas sondas, actualmente son utilizadas por muchos agricultores y técnicos en la zona para el control de la salinidad (conductividad eléctrica). En la misma solución de suelo extraída para determinar la conductividad eléctrica, es sencillo analizar los nitratos. Hay dos métodos para analizar la concentración de nitratos: (i) en un laboratorio comercial o (ii) mediante test rápidos de análisis (Fotografía 3) que se pueden realizar en la misma finca.

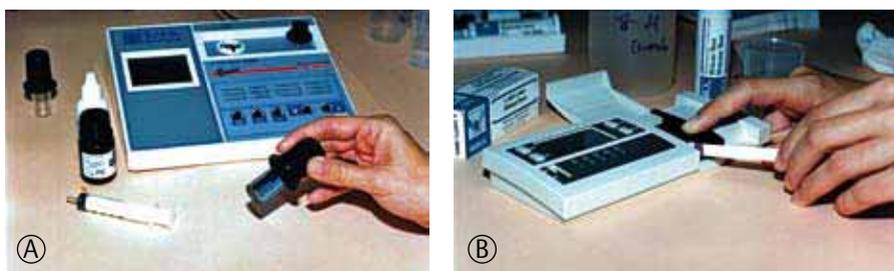
Estudios realizados con sondas de succión, en la Estación Experimental de la Fundación Cajamar, en colaboración con la Universidad de Almería, han demostrado que las sondas de succión son muy sensibles a cambios en la cantidad de abonado nitrogenado aportado durante el ciclo de cultivo. Sin embargo, su utilización para controlar la fertilización nitrogenada del cultivo requiere de algunas consideraciones para asegurar su efectividad. En el Anexo se incluye una lista de recomendaciones para la instalación y el uso de las sondas de succión.

El manejo de la fertilización nitrogenada con sondas de succión consiste en mantener la concentración de nitratos en la solución del suelo en un rango adecuado de concentración de nitratos, que evite aportes excesivos o deficitarios de N para el cultivo. En los cultivos hortícolas desarrollados bajo invernadero en Almería, no se ha establecido este rango de concentración de nitratos en la solución del suelo. Sin embargo, la tendencia de la concentración de nitrato en la solución de suelo de la zona de la raíz es un buen indicador de si la fertilización nitrogenada está siendo adecuada. Si la concentración de nitratos aumenta a lo largo del tiempo, indica que el N se está

aportando en exceso, ya que se está produciendo una acumulación en el suelo. Si la concentración de nitrato disminuye con el tiempo, probablemente el N aportado está siendo insuficiente. En estudios experimentales en Almería, se han utilizado límites de concentración de nitratos en la solución del suelo extraída con sondas de succión entre 8–12 mmol L<sup>-1</sup> a lo largo del ciclo de cultivo, con buenos resultados productivos y reduciendo las pérdidas de nitratos por lixiviación. Estos valores son conservadores, pero combinados con la determinación de la tendencia de la concentración, proporcionan un punto de partida útil como aproximación en el manejo de la fertilización nitrogenada con sondas de succión.



Fotografía 2. Distintos tipos de sondas de succión para extracción de solución de suelo (a y b).



Fotografía 3. Analizadores rápidos de nitratos: Merck RQFlex reflectómetro (a) y Hanna C-115 colorímetro.

## Casos prácticos de manejo de la fertilización nitrogenada de cultivos con sondas de succión

En la Estación Experimental de la Fundación Cajamar se realizó un estudio en dos invernaderos de 24 x 18 metros y orientación este-oeste, en colaboración con la Universidad de Almería. El suelo de los invernaderos era un suelo artificial 'enarenado' típico de la comarca, compuesto por un suelo con textura franco-arcillosa de 25 cm de espesor aportado sobre el suelo original (textura franco-limosa), y sobre el cual se extendía una capa de 10 cm de espesor de arena gruesa. Este suelo se creó en 1995, con la construcción del invernadero. Cada invernadero tenía dos lisímetros, de 4 m de largo x 2 m de ancho y 0,7 m de profundidad, en los que diariamente se midió el volumen de agua drenada o lixiviada y se tomó una muestra para determinar la cantidad de nitratos perdidos por lixiviación.

En Junio de 2003 se añadió estiércol, con un aporte de 1270 kg N ha<sup>-1</sup>. Se utilizó un sistema de riego por goteo superficial. Los goteros (2,8 L h<sup>-1</sup>) fueron colocados a 50 cm, con una distancia de 1 metro entre líneas adyacentes. Los nutrientes fueron aplicados mediante fertirrigación.

En un primer caso, en cada uno de los invernaderos se dispuso de un cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* L., cv. 'Boludo'), cuyo transplante se realizó el 22 de septiembre de 2004 y una duración de 160 días, en un segundo caso se plantó pimiento (*Capsicum annuum* L., cv. 'Vergasa'), el 21 de Julio de 2005 y una duración de 152 días. En ambos cultivos, se colocó una planta por gotero, a 8 cm del mismo, y la densidad de plantación fue de 2 plantas m<sup>-2</sup>.

En ambas experiencias (tomate y pimiento), se siguió un manejo de nitrógeno convencional (MC) en el primer invernadero, siguiendo las pautas de manejo utilizadas por los agricultores de la zona. Durante las 3 primeras semanas de cultivo se aportó sólo agua en ambos tratamientos. El volumen de riego aportado durante el ciclo de cultivo en MC fue de 210 mm y 314 mm, para tomate y pimiento, respectivamente. Los aportes de nitratos en las diferentes etapas del cultivo, para el tratamiento convencional, se presentan en la Cuadro 1.

En el segundo invernadero se estableció un manejo de riego y/o aporte de N encaminado a la reducción de las pérdidas de nitratos por lixiviación (MRN). Se desarrolló

un manejo prescriptivo-correctivo, respecto al riego y aporte de N, utilizando tensiómetros y sondas de succión. El volumen de riego se calculó utilizando el programa PrHo y el riego se aplicó cuando la lectura de tensiómetros estaba entre 30–40 centibares, además la dosis de riego se adaptó con el fin de mantener la lectura de los tensiómetros entre 15–40 centibares. En MRN el volumen de riego aportado en todo el ciclo de cultivo fue 189 mm y 260 mm para tomate y pimiento, respectivamente. Este volumen resultó ser un 10% y 15 % menor al volumen aportado en MC. La concentración de nitratos aportada en el agua de riego para el tratamiento MRN se presenta en la Cuadro 1. La concentración de nitrato en la solución del suelo en el tratamiento MRN se mantuvo generalmente entre 12–14 mmol L<sup>-1</sup> en tomate y 7–12 mmol L<sup>-1</sup> en pimiento, lo cual es consistente con las concentraciones de N aplicadas en soluciones nutritivas en cultivos hidropónicos en la zona, y que es aceptada de forma generalizada como una concentración adecuada para la producción de cultivos hortícolas en invernadero. En ambos cultivos la concentración de nitratos en el agua de riego fue igual a MC durante el cuajado, y un 30% menor respecto a MC durante el resto del periodo en ambos cultivos, tomate y pimiento.

**Cuadro 1.** Concentración de nitratos en la solución nutritiva aportada en ambos invernaderos. MC: Manejo Convencional, MRN: Manejo del Riego y Nitrógeno mejorado.

	Tomate		Pimiento	
	MC	MRN	MC	MRN
	(mmol L <sup>-1</sup> )		(mmol L <sup>-1</sup> )	
Cuajado	9	9	9	9
Engorde	14	10	13	9
Maduración	14	10	11	8

### Resultados respecto al volumen de agua aportado y drenado

El manejo preventivo-correctivo del agua de riego supuso sólo un 10% y un 15% menos de volumen aplicado en el tratamiento MRN respecto a MC, para tomate y pimiento respectivamente. El volumen de drenaje obtenido fue de 33 mm y 90 mm en MRN. Este volumen fue un 25% y un 35% menor al obtenido en el manejo convencional, para tomate y pimiento, respectivamente (44 mm y 137 mm).

## Resultados respecto a la concentración de nitratos en la solución de suelo

La concentración de nitratos en la solución de suelo a 15 cm de profundidad, en el cultivo manejado de forma convencional (MC), aumentó de manera progresiva en tomate y pimiento a partir de la aplicación de los dos manejos de nitrógeno, alcanzando en ambos un nivel máximo de aproximadamente  $23 \text{ mmol L}^{-1}$  al final del cultivo (Fig. 4-a y 5-a). El incremento en la concentración de nitratos respecto al inicio del ciclo de cultivo fue de 11 y  $13 \text{ mmol L}^{-1}$  en tomate y pimiento, respectivamente (Fig. 4-a y 5-a). En el manejo reducido en el aporte de nitratos, y controlado con sondas de succión (MRN), la concentración de nitratos en la solución de suelo, se mantuvo relativamente constante en  $13 \text{ mmol L}^{-1}$  en tomate y entre  $7\text{-}11 \text{ mmol L}^{-1}$  en pimiento (Fig. 4-a y 5-a), durante todo el ciclo de cultivo.

Al inicio del periodo bajo tratamientos diferenciales, la concentración de nitratos en la solución de suelo a 15 cm fue semejante para ambos manejos (Fig. 4-a y 5-a). Sin embargo, durante la mayor parte del periodo bajo tratamientos de N diferentes, esta concentración fue claramente mayor en el cultivo MC respecto al cultivo MRN.

Durante el inicio del cultivo de tomate, hubo una importante variabilidad entre repeticiones en la concentración de nitrato en la solución del suelo (CV 49%), debido a la instalación en zonas donde ocurrieron infiltraciones de agua tras un periodo de lluvia. Una vez colocadas en lugares representativos, la variabilidad fue menor, siendo el coeficiente de variación medio (CV) de las concentraciones de nitrato en la solución de suelo del 13% y 6%, para tomate y pimiento, respectivamente. Sin embargo, las tendencias seguidas por cada tratamiento fueron claras, poniéndose de manifiesto diferencias entre los dos tratamientos.

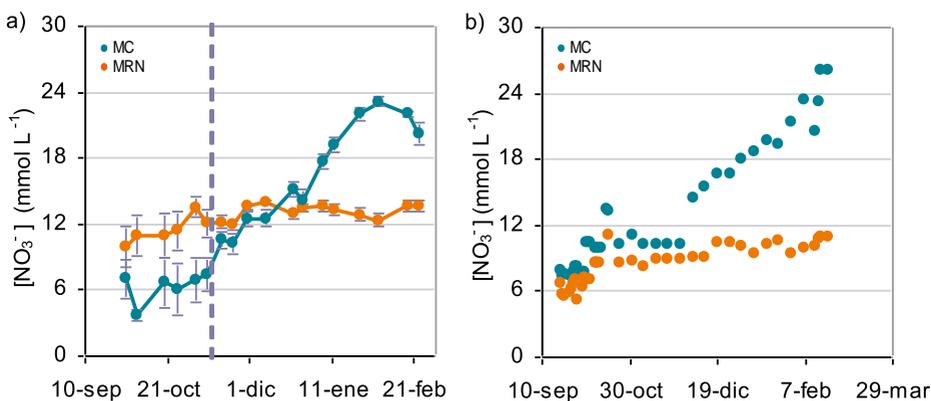
## Resultados respecto al aporte (fertilización) y lixiviación de Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ )

El aumento en MC de la concentración de nitratos en la solución de suelo a lo largo del cultivo también se vio reflejada en la concentración de nitratos en la solución lixiviada o drenada (Fig. 4-b y 5-b). En el tratamiento MRN la concentración de nitratos en la solución lixiviada se mantuvo constante (Fig. 4-b y 5-b). En el tratamiento MC, consi-

derando el volumen drenado 44 mm para tomate y 136 mm para pimiento, la elevada concentración de nitratos lixiviada supuso una pérdida total de nitratos de  $60 \text{ kg NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$  y  $216 \text{ kg NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$  en tomate y pimiento, respectivamente. En el tratamiento MRN, con 33 mm y 90 mm drenados en tomate y pimiento, respectivamente, el nitrógeno perdido por lixiviación se redujo en un 45% para tomate y 50% para pimiento, respecto al tratamiento convencional.

La producción de fruto total y comercial, la calidad del fruto, así como la producción total de biomasa de planta al final del ciclo de cultivo, no presentó diferencias significativas ( $P < 0,05$ ; ANOVA) respecto a los tratamientos con distinto aporte de nitrógeno en fertirriego (Cuadro 2).

## Discusión



**Figura 4.** Concentración de nitratos en la solución de suelo extraída con sondas (a) y lixiviada (b) durante el cultivo de tomate con manejo convencional (MC) y con manejo del riego y nitrógeno mejorado (MRN). Valores promedio de seis repeticiones. Las barras representan el error estándar de la media. La línea discontinua indica el inicio del manejo del abonado nitrogenado con sondas de succión en el tratamiento MRN.

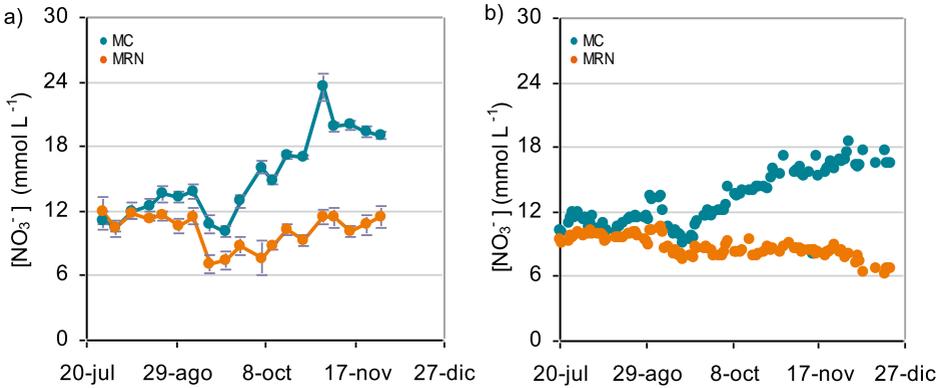


Figura 5. Concentración de nitratos en la solución de suelo extraída con sondas (a), y lixiviada (b) durante el cultivo de pimiento con manejo convencional (MC) y con manejo del riego y nitrógeno mejorado (MRN). Valores promedio de seis repeticiones. Las barras representan el error estándar de la media. La línea discontinua indica el inicio del manejo del abonado nitrogenado con sondas de succión en el tratamiento MRN.

Cuadro 2. Producción total y comercial de fruto, y producción total de biomasa de planta. MC – manejo convencional, MRN: Manejo del Riego y Nitrógeno mejorado. Los valores son promedio de cuatro repeticiones

	FRUTO		PLANTA
	Total (kg m <sup>-2</sup> )	Comercial (kg m <sup>-2</sup> )	Materia seca (g m <sup>-2</sup> )
<b>Cultivo de tomate</b>			
MC	15,5	14,0	1788
MRN	16,1	14,6	1711
<b>Cultivo de pimiento</b>			
MC	7,0	6,2	720
MRN	6,6	5,8	685

El aumento en la concentración de nitratos en la solución de suelo en el cultivo bajo manejo convencional (MC), es indicativo de un aporte excesivo de nitrógeno mineral, por encima de las necesidades nutricionales del cultivo. En el tratamiento MRN, la concentración de nitrato en la solución del suelo permaneció relativamente constante sugiriendo que las cantidades de fertilizante nitrogenado aplicadas fueron suficientes para satisfacer las necesidades del cultivo. La producción total y comercial de fruto, así como la producción total de biomasa de planta, no se vio afectada por los distintos tratamientos. Estos datos sugieren que el análisis de la evolución de la concentración de nitrato del suelo puede ser útil para determinar si las aplicaciones de N son adecuadas o excesivas.

La concentración de nitrato en la solución del suelo en el tratamiento MRN se mantuvo generalmente entre 12–14 mmol L<sup>-1</sup>, lo cual es consistente con las concentraciones de N aplicadas en soluciones nutritivas en cultivos hidropónicos en la zona, y que es aceptada de forma generalizada como una concentración adecuada para la producción de cultivos hortícolas en invernadero. Hartz et al. (1994) han sugerido que valores de 6 mmol L<sup>-1</sup> de nitrato en la solución del suelo son adecuados para cultivos bajo riego por aspersión, pero también indican que cuando se emplean sistemas de riego localizados como el goteo se requieren valores superiores.

El aumento progresivo de la concentración de nitrato en la solución del suelo en MC es indicativo de una acumulación de nitrato en el perfil del suelo. Esta acumulación de nitrato es susceptible de ser lixiviada durante riegos posteriores con un elevado volumen de agua como son, (i) los riegos para la desinfección del suelo, o el riego aplicado en los días previos al transplante para asegurar una adecuada humedad del suelo, y (ii) durante las primeras semanas tras el transplante cuando los riegos suelen ser superiores a las necesidades de los cultivos (Thompson et al., 2007).

La variabilidad observada entre repeticiones que es característica de las sondas de succión (Grossmann y Udluft, 1991), es atribuida a la variabilidad en las propiedades físicas y químicas del suelo, y también a la heterogeneidad en la distribución del agua y nutrientes en el suelo que está asociada con el riego por goteo. Una fuente de variación considerable encontrada en este estudio, que retrasó la imposición de los tratamientos de N fue el efecto de la entrada de lluvia en el invernadero en varios puntos del mismo. Cuando se emplean sondas de succión es muy importante asegurarse que se instalen en zonas representativas de la parcela o el invernadero a seguir;

en caso contrario, el elevado grado de variabilidad puede dificultar la interpretación de los datos.

## Conclusiones

Los resultados de este estudio sugieren que el seguimiento a lo largo del cultivo de la concentración de nitratos de la solución del suelo mediante el uso de sondas de succión es válido para determinar si la fertilización nitrogenada es adecuada o excesiva.

## Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado por el proyecto AGL2004-07399 del Ministerio de Educación y Ciencia.

## Referencias

**Anon., Ministerio de la Presidencia (1996).** Real Decreto 261/1996 de 16 Febrero adoptando la Directiva 91/676/EEC sobre protección de las aguas contra la contaminación causada por nitratos de origen agrario. Boletín Oficial del Estado (BOE) nº 61, 11-03/1996: 9734-9737.

**Anon., Consejería de la Presidencia de Andalucía (1999).** Decreto 261/1999 de 15 Diciembre de 1998 estableciendo zonas vulnerables a la contaminación por nitratos en la Comunidad Autónoma de Andalucía. Boletín Oficial de la Junta de Andalucía (BOJA) nº 5, 12/01/1999: 405-406

**Anon., Consejería de la Presidencia (2008).** Decreto 36/2008, de 5 de Febrero, por el que se designan zonas vulnerables y se establecen medidas contra la contaminación por nitratos de origen agrario. Boletín Oficial de la Junta de Andalucía (BOJA) nº 36, 20/02/2008: 5-15

**Cajamar, (2005).** Pulido-Bosch A. (coord.), Recarga en la Sierra de Gádor e hidrogeoquímica de los acuíferos del Campo de Dalías, 337 p. Estación Experimental Cajamar (ed.). ISBN 84-95531-29-1

**Grossmann, J. y Udluft, P., (1991).** The extraction of soil water by the suction-cup method: a review. Journal of Soil Science, 42: 83-93.

Hartz, T.K.; Smith, R.F., Schulbach, F.F.; Lestrangle, M., (1994). On-farm nitrogen tests improve fertilizer efficiency. Calif. Agric. 48 (4): 29-32.

EC, Comisión Europea, (1991). Directiva del Consejo 91/676/EEC de 12 Diciembre de 1991 relativa a la protección de las aguas contra la contaminación por nitratos de origen agrario . Diario Oficial de las Comunidades Europeas, L 375, 31/12/1991: 1-8

EC, Parlamento y Consejo de la Unión Europea, (2000). Directiva Marco del Agua 2000/60/EEC de 23 de Octubre de 2000, estableciendo un marco de acción comunitaria en el campo de la política de aguas. Diario Oficial de las Comunidades Europeas, L 327, 22/12/2000: 1-73

Fernández M.D., González A.M., Carreño J., Pérez C. y Bonachela S., (2007). Análisis of on-farm performance in Mediterranean greenhouses. Agricultural Water Management 89 (3): 251-260. DOI: 10.1016/j.agwat.2007.02.001

García M.C. y Alonso M.M., (2006). Contaminación por nitratos de origen agrario (revisión legislativa). Cuadrado I.M. (ed.), FIAPA Fundación para la Investigación Agraria en la Provincia de Almería. ISBN: 84-690-2662-3

Pérez-Parra J.J. y Céspedes A., (2001). Análisis de la demanda de inputs para la producción en el sector de cultivos protegidos de Almería. In: Cuadrado I.M. (ed.), Estudio de la demanda de inputs auxiliares: producción y manipulación en el sistema productivo hortícola almeriense. FIAPA, Almería, Spain, pp. 1-120

Pulido-Bosch A., Vallejos A., Molina, L. and Pulido Leboeuf P., (2000). Problemática hidrogeológica del Campo de Dalías-Sierra de Gádor (Almería). In: El Campo de Dalías, paradigma de uso intensivo. Papeles de Proyecto Aguas Subterráneas, Serie A 4: 5-36

Thompson R.B., Martínez-Gaitan C., Gallardo M., Jiménez C. y Fernández M.D., (2007). Identification of irrigation and N management practices that contribute to nitrate leaching loss from an intensive vegetable production system by use of a comprehensive survey. Agricultural Water Management 89 (3): 261-274. DOI: 10.1016/j.agwat.2007.01.013.

## ANEXO

### Recomendaciones sobre el uso de las sondas de succión

Instalación en lugares representativos del cultivo, evitando lugares en los que puedan existir infiltraciones de agua, como son zonas bajo canaletas de recogida de aguas, y los bordes del invernadero (bandas y pasillos).

Se recomienda un número mínimo de dos (mejor tres) sondas.

Instalar las sondas en la zona de máxima concentración de raíces, entre 8 y 10 cm al lado de las plantas, con la capsula cerámica a profundidad de 10-15 cm (Figura 6). También es recomendable instalar sondas de succión más profundas, a 30-35 cm, por debajo de las raíces, que nos indicará la existencia de pérdidas de nitratos por lixiviación.

Aplicación de vacío (-60 kPa) durante al menos 24 horas después de un riego, una vez que el riego anterior se ha estabilizado en el suelo. Si la frecuencia de riego es diaria, el vacío se deberá aplicar al menos 6-8 horas después de aplicar el riego.

Recogida de la muestra antes de la aplicación del siguiente riego, para recoger solo el agua que se encuentra en equilibrio con el suelo, evitando la entrada del agua procedente de la solución nutritiva.

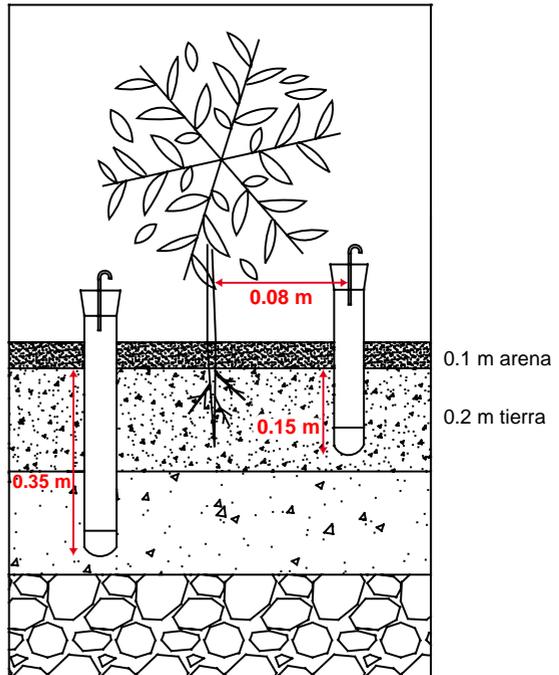


Figura 6. Colocación de sondas de succión para extracción de solución del suelo.





> El seguimiento de la concentración de nitratos en la solución del suelo, a lo largo del desarrollo de un cultivo, puede ser un método adecuado para establecer una fertilización correcta, en cumplimiento de las nuevas exigencias legislativas sobre nitratos.