



34

Monografías

Mejora en la eficiencia del uso de agua y fertilizantes en agricultura

Juan Carlos Gázquez
(coordinador)

Mejora en la eficiencia del uso de agua y fertilizantes en agricultura

Mejora en la eficiencia del uso de agua y fertilizantes en agricultura

Juan Carlos Gázquez
(coordinador)

Mejora en la eficiencia del uso de agua y fertilizantes en agricultura

© 2018 del texto y las imágenes que se reproducen (excepto mención expresa): los autores

© 2018 de la edición: Cajamar Caja Rural

Edita: Cajamar Caja Rural

www.publicacionescajamar.es

publicaciones@cajamar.com

ISBN-13: 978-84-95531-88-9

Diseño y maquetación: Beatriz Martínez Belmonte

Fecha de publicación: marzo de 2018

Cajamar Caja Rural no se responsabiliza de la información y opiniones contenidas en esta publicación, siendo responsabilidad exclusiva de sus autores.

© Todos los derechos reservados. Queda prohibida la reproducción total o parcial de esta publicación, así como la edición de su contenido por medio de cualquier proceso reprográfico o fónico, electrónico o mecánico, especialmente imprenta, fotocopia, microfilm, offset o mimeógrafo, sin la previa autorización escrita de los titulares del Copyright.

Presentación.....13

Aplicación de la solución nutritiva y el control de la fertirrigación en suelo.....17

Teodoro Moreno Iniesta

1. Aplicación de la solución nutritiva y control del proceso de fertirrigación...	17
1.1. Introducción	17
1.2. Aplicación de la Solución Nutritiva.....	19
1.2.1. Ajuste y cálculo de la solución nutritiva	20
1.2.2. Aplicación de la SN con abonadora	22
1.2.3. Aplicación de la SN con Venturis y control manual de la inyección.....	24
1.2.4. Aplicación de la SN con Venturis y control de la inyección por medición de la CE.....	28
1.2.5. Aplicación de la SN con Venturis y control de la inyección por medición de la CE y del pH.....	31
1.3. Mezcla de soluciones nutritivas.....	32
1.4. Control de la fertirrigación	34
Referencias bibliográficas	41

Planteamiento y gestión de soluciones nutritivas en cultivos hortícolas.....43

Antonio L. Alarcón Vera

1. Prioridades en agricultura intensiva	43
2.2. Manejo y control nutricional en fertirrigación	48
2.2.1. Enfoque nutricional en fertirriego. Soluciones nutritivas (SN) ...	48
2.2.2. Factores influyentes y control del balance vegetativo/generativo. Relación N/K	51
2.2.3. Elección del balance vegetativo/generativo apropiado.....	55
2.2.4. Establecimiento de la relación N/K. Valores de referencia	59
2.2.5. Relaciones N/K según cultivos.....	61
2.2.6. Establecimiento del resto de componentes de la solución nutritiva. Balances nutricionales	62
2.2.7. Estrategia de uso y cambios de la solución nutritiva	64
2.3. Consideraciones y diagnóstico nutricional de la SN	66
2.3.1. Consideraciones generales.....	66
2.3.2. pH.....	67
2.3.3. Dinámica de absorción de los diferentes nutrientes	68
2.3.4. Interacciones entre elementos	69
2.3.5. Temperatura.....	69
2.3.6. Movilidad de los elementos en la planta	71

2.4. Seguimiento y control nutricional.....	71
2.4.1. Información complementaria.....	71
2.4.2. Seguimiento y control nutricional en fertirriego.....	73
2.4.3. Análisis de sondas de succión, extracto saturado y/o extracto 1:2.....	77
2.4.4. pH y bicarbonatos	78
2.4.5. Conductividad eléctrica	79
2.4.6. Calcio y magnesio.....	80
2.4.7. Nitratos y potasio	81
2.4.8. Amonio	82
2.4.9. Fosfatos.....	82
2.4.10. Sodio y cloruros.....	83
2.4.11. Sulfatos.....	83
2.4.12. Boro	84
2.4.13. Micronutrientes metálicos.....	84
2.5. Frecuencia de muestreos	85

Reducción de las pérdidas de nitrógeno en cultivos sin suelo.....87

Juan José Magán Cañadas

1. Introducción	87
2. Sistemas a solución perdida	88
3. Sistemas cerrados.....	96
Referencias bibliográficas.....	105

Uso de sensores de humedad en suelo para mejorar el manejo del riego en cultivos de invernadero107

Marisa Gallardo y Rodney B. Thompson

1. Introducción	107
2. Consideraciones técnicas relacionadas con el uso de sensores para el manejo del riego	108
2.1. Instalación de los sensores en el suelo o medio de cultivo.....	108
2.2. Sistemas de registro y transferencia de datos	109
2.3. Configuración de los sensores en campo.....	111
2.4. Uso e interpretación de los datos obtenidos con sensores para el manejo del riego.....	113
3. Descripción de los sensores de medida del estado hídrico del suelo y su uso en la programación del riego.....	115
3.1. Sensores de medida del potencial mátrico del medio de cultivo	115
3.2. Sensores de medida de la humedad volumétrica del medio de cultivo...	117
4. Uso de sensores para el control del riego en sustratos.....	124
5. Resultados de ensayos experimentales de comparación de manejo del riego.....	126
6. Aspectos generales sobre el uso de sensores para la programación de riegos	128
Referencias bibliográficas.....	130

Automatización del riego en suelo: ejemplo práctico. Evaluación de sensores para su uso en la automatización131

María Dolores Fernández Fernández

1. Introducción	131
2. Ensayo automatización del riego.....	132
3. Ensayo de automatización del riego en un cultivo de pepino	135
4. Evaluación de sensores para la automatización del riego.....	138
5. Evaluación sensor ECH ₂ O 5TE	140
6. Evaluación sensor MPS2	142
7. Establecimiento de límites de humedad o potencial para el uso de los sensores 5TE y MPS2 en la automatización del riego en cultivos hortícolas en invernadero y suelo enarenado.....	144
Referencias bibliográficas	144

Uso de sondas de succión para el manejo del fertirriego en horticultura intensiva.....147

María Teresa Lao Arenas

1. Concepto de nutrición de las plantas. Un marco donde situarnos.....	147
2. Fertirrigación. Criterios de aplicación.....	148
3. Sondas de succión. ¿Qué nos pueden aportar?	149
4. Definición de sonda para materiales y métodos de AP	152
5. Manejo de las sondas de succión	154
5.1. Limpieza de las sondas de succión antes de su instalación en campo.....	154
5.2. Comprobación del estado de las sondas antes de su instalación en campo	154
5.3. ¿Dónde colocar las sondas y cuantas debemos instalar en cada invernadero?.....	155
5.4. ¿Cómo se instalan?.....	156
5.5. Toma de muestras.....	157
6. Número de muestreos a lo largo del cultivo	158
7. Parámetros de referencia	159
8. Como nos ayudan las sondas a mejorar el fertirriego.....	162
Referencias bibliográficas	166

Manejo mejorado del riego y la fertilización mediante el uso de tensiómetros y sondas de succión en cultivos intensivos.....169

María Rosa Granados, Rodney B. Thompson, María Dolores Fernández y Marisa Gallardo

1. Introducción	169
2. Material y métodos.....	170
3. Resultados	174
4. Discusión	177
5. Conclusiones.....	177
Referencias bibliográficas	178

Aplicaciones prácticas de los sistemas de análisis rápidos de nutrientes para mejorar el manejo del nitrógeno en cultivos de invernadero181

Rodney B. Thompson, María Milagros Fernández Fernández,
Gema Cánovas Fernández y Marisa Gallardo

1. Introducción	181
2. Características de los sistemas de análisis rápidos de nitrato	182
3. Aplicaciones de sistemas de análisis rápidos de nitrato	182
<i>Nitratos en la solución del suelo</i>	183
<i>Nitrato en Savia</i>	185
4. Equipos disponibles.....	185
<i>LAQUAtwin</i>	186
<i>RQ Flex Reflectoquant</i>	190
<i>Sistema Clean Grow</i>	194
5. Observaciones sobre el uso de los equipos.....	195
6. Consejos generales.....	196
7. Ejemplos de seguimiento de cultivos en Almería.....	196
8. Protocolos para el uso del análisis rápido de nitrato en la solución del suelo.....	198
9. Programa piloto para introducir sondas de succión y sistemas de análisis rápido a la comunidad agrícola en Almería.....	199
Referencias bibliográficas.....	200
Anexo 1. Proveedores de sistemas de análisis rápidos, sondas de succión y material para hacer diluciones.....	201
Anexo 2. Fuentes de más información sobre los sistemas de análisis rápidos y otro material relevante	202

Patrones de humectación y distribución de sales en los suelos de los invernaderos203

Fernando del Moral Torres

1. Introducción y objetivos.....	203
2. Conociendo el sistema: fundamentos teóricos.....	204
<i>Movimiento del agua en el suelo. Infiltración. Suelos organizados en capas. Redistribución</i>	204
3. Redistribución del agua del suelo tras la infiltración.....	208
4. Movimiento de agua desde el suelo hacia la raíz y a través de esta	209
5. Eficiencia en la captación de agua y nutrientes: el sistema radicular	210
6. ¿Qué características del suelo están relacionadas con la elongación del sistema radicular?	211
Referencias bibliográficas.....	214

**Estudio de casos en suelos arenados de los invernaderos de Almería:
movimiento del agua, movimiento de sales217**

Fernando del Moral Torres

1. Formas de medir o estimar la humedad del suelo.....	217
2. Material y métodos.....	218
2.1. <i>Diseño experimental</i>	218
2.2. <i>Análisis de suelo y acolchado</i>	218
2.3. <i>Humectación del suelo</i>	219
2.4. <i>Distribución de sales en el suelo</i>	220
3. Resultados y discusión.....	221
3.1. <i>Propiedades de los acolchados</i>	221
3.2. <i>Principales características de los suelos</i>	223
3.3. <i>Patrón de distribución de humedad en las diferentes parcelas</i>	225
4. Efecto del patrón de distribución de la humedad del suelo sobre la distribución de sales en cada sector.....	234
5. Conclusiones.....	236
Referencias bibliográficas	237

Presentación

La gestión del agua de riego es el mayor reto al que se enfrenta la agricultura española en el momento actual. La cantidad y calidad de los recursos disponibles es un factor limitante de primer orden en muchas zonas productoras del país, por lo que es imprescindible seguir avanzando en un aprovechamiento cada vez más eficiente y la racionalización en el uso de un recurso tan escaso.

La agricultura intensiva bajo abrigo es una de las alternativas más sostenibles para garantizar el suministro de alimentos a una población creciente en un contexto de restricción permanente, como es el caso de los climas templados y semiáridos. En este sentido, el invernadero es una herramienta estratégica del sistema agroalimentario mundial, que ha permitido atender las exigencias crecientes en calidad y cantidad de alimentos a precios competitivos y de un modo eficiente en el uso de los recursos, como son la tierra y el agua.

Sin embargo, todos los sistemas agrícolas de regadío comparten ciertas externalidades negativas, como es la sobreexplotación de los recursos hídricos y la contaminación de las aguas principalmente por nitratos. Para abordar estos aspectos es necesario seguir mejorando la eficiencia del riego aprovechando las mejores tecnologías disponibles.

En el desarrollo de cualquier sistema agrícola sostenible es imprescindible hacer un uso racional tanto de agua como de fertilizantes. En muchas ocasiones se disponen volúmenes de agua de riego superiores a los necesarios, asociados a la solarización, desinfección química de suelo y el riego de pretransplante, siendo necesario reducir las cantidades aplicadas en estos riegos a un volumen mínimo efectivo. Para ellos disponemos de cada vez más y mejores tecnologías y herramientas para controlar las cantidades a aportar de estos insumos.

Esta ha sido, desde hace más de 40 años, una de las líneas de trabajo prioritarias de la Estación Experimental Cajamar. Ahora, con la edición de este libro, hemos querido actualizar el conocimiento disponible y ponerlo a disposición de los profesionales del sector, profundizando en todos los aspectos que influyen en

la mejora en la eficiencia, e intentando trasladar las experiencias y los resultados obtenidos en el ámbito de la horticultura intensiva al resto de cultivos.

Así, las páginas que siguen recogen en 10 capítulos las aportaciones de 11 expertos en la materia, que han abordado aspectos clave tales como la formulación de soluciones nutritivas y su gestión, el uso de sensores de humedad, sondas de succión y sistemas de análisis rápidos de nutrientes para mejorar el manejo del fertirriego, la reducción de las pérdidas de nitrógeno en cultivos sin suelo y los patrones de humectación y distribución de sales en los suelos.

*En la primera aportación, el especialista **Teodoro Moreno** introduce el concepto de ‘solución nutritiva’, y cómo ajustar, calcular y aplicarla a través de distintos sistemas de fertirrigación, así como los mecanismos de control que permitan verificar que se ejecuta de forma correcta.*

*En la segunda, **Antonio L. Alarcón**, de la Universidad Politécnica de Cartagena, nos enseña cómo realizar el planteamiento y gestión de soluciones nutritivas en hortalizas, incidiendo en el control del balance vegetativo/generativo a través de la fertirrigación (relación N/K).*

*En el tercer capítulo, **Juan José Magán**, de la Estación Experimental Cajamar, se ha centrado en la reducción de las pérdidas de nitrógeno en cultivos sin suelo, tanto en sistemas a solución perdida como en sistemas cerrados, recomendando estrategias para minimizar las cantidades de agua y fertilizantes aportados. En este sentido, conviene recordar que el futuro de los cultivos sin suelo pasa por dar el salto a los sistemas cerrados si se dispone de la calidad de agua de riego necesaria.*

*Para poder mejorar el manejo del riego es necesario el uso de los sensores de humedad del suelo. En la actualidad, se dispone de una amplia gama de sensores y aplicaciones en información y telecomunicaciones que pueden resultar de gran utilidad para una gestión más eficiente del riego y fertilización en los cultivos, aunque los usuarios finales se ven frecuentemente desconcertados ante la amplitud de la oferta. Esta cuestión ha sido tratada por **Marisa Gallardo** y **Rodney B. Thompson**, de la Universidad de Almería, mediante una revisión de los tipos de sensores disponibles y de cómo instalarlos y manejarlos. Por ello, es importante que centros tecnológicos como la Estación Experimental Cajamar contrasten la utilidad práctica de estas tecnologías avanzadas.*

*A continuación, y de la mano de **María Dolores Fernández**, de la Estación Experimental Cajamar, se presentan las experiencias realizadas en este centro tecnológico para automatizar el riego en suelo con abundante remisión a ejemplos prácticos.*

*En el siguiente capítulo, **María Teresa Lao**, de la Universidad de Almería, se aborda desde una perspectiva eminentemente aplicada cómo utilizar las sondas de succión. Cada día será más frecuente el uso combinado de estas y tensiómetros junto con los sistemas de análisis rápidos de nutrientes para mejorar el manejo del riego y la fertilización, lo que permite optimizar las aportaciones de agua y fertilizantes de forma sencilla y eficiente.*

En este manual también se recogen experiencias en las que se ha realizado un manejo mejorado del riego y la fertilización mediante el uso de tensiómetros y sondas de succión, y se muestra la utilidad de los sistemas de análisis rápidos de nutrientes para mejorar el manejo del nitrógeno en cultivos de invernadero.

*Por último, **Fernando del Moral**, también investigador del Campus almeriense, analiza la importancia del suelo en el manejo del riego y muestra ejemplos de movimiento de agua y sales en los suelos enarenados de los invernaderos de Almería.*

Tan solo resta, antes de dar paso al contenido del volumen, dejar constancia del más sincero agradecimiento de Cajamar Caja Rural hacia los autores que han participado en esta obra, resaltando que han cumplido sobradamente con el encargo inicial que recibieron: elaborar desde diversas perspectivas una publicación eminentemente práctica, que ayude a mejorar el desempeño diario de todos aquellos profesionales implicados en la gestión de los cultivos. Por todo ello, confiamos en que este volumen se convierta en un elemento de consulta habitual tanto de los estudiantes de las diversas ramas de formación en Agronomía como de los expertos del asesoramiento agronómico, y por supuesto para empresarios agrícolas que, con su trabajo diario a pie de campo, son el auténtico motor de la horticultura intensiva española.

Juan Carlos Gázquez Garrido
Estación Experimental Cajamar

Aplicación de la solución nutritiva y el control de la fertirrigación en suelo

Teodoro Moreno Iniesta

Ingeniero Técnico Agrícola

1. Aplicación de la solución nutritiva y control del proceso de fertirrigación

1.1. Introducción

La fertirrigación consiste en aportar los nutrientes a la planta a través, y en función, del agua de riego. Es un nuevo concepto agrario que nace con el advenimiento del riego localizado por goteo, allá por mitad del siglo pasado. Esta técnica está basada en que los elementos nutritivos se encuentran disueltos en el agua de la rizosfera y que la planta «bebe» los nutrientes. Fisiológicamente, los procesos de absorción de agua y nutrientes son independientes pero, desde un punto de vista cuantitativo, existen numerosas evidencias de la alta correlación entre estos dos factores de la producción. Martínez *et al.* (2010) trabajando en la cinética de absorción hídrica y mineral (nitratos) en un cultivo de rosal para flor cortada sobre perlita, encontraron altas correlaciones entre estos dos parámetros. No obstante vieron que las tasas de absorción hídrica varían a lo largo del ciclo de desarrollo del cultivo en una proporción de 1 a 3 mientras que la tasa de absorción de nitratos lo hace en la proporción de 1 a 5. Así mismo detectaron que las condiciones de estrés producidas por la climatología estival afectaban más negativamente a la absorción mineral que a la hídrica. A pesar de ello, en condiciones climáticas normales, quedó de manifiesto la alta correlación positiva entre la tasa de transpiración y la absorción de nitratos.

Actualmente no se pone en duda que, la mejor manera de resolver el problema nutricional de los cultivos hortícolas, está basado en el mantenimiento equilibrado, y relativamente constante, de unas determinadas concentraciones de los distintos elementos nutritivos en el agua de riego. A la mezcla formada por el agua de riego y los nutrientes minerales disueltos en ella se le denomina solución nutritiva (SN). La concentración de cada uno de

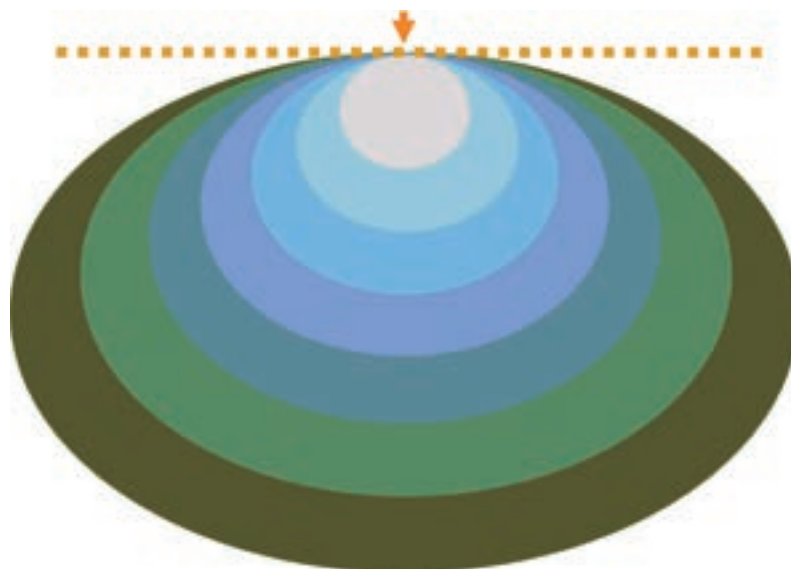
los aniones y cationes que conforman esta SN se expresa en mg L^{-1} , mmol L^{-1} o meq L^{-1} . El total de sales disueltas en el agua de riego, o cualesquiera de las soluciones nutritivas manejadas en fertirrigación, se cuantifica como un valor de conductividad eléctrica (CE) medido en dS m^{-1} .

Atendiendo a estas consideraciones, en los procesos productivos de una horticultura intensiva y empresarial, no debe de desligarse el riego del abonado. En el binomio riego-abonado es prioritario el riego frente al abonado. Para abonar bien primero hay que regar bien. Dicho de otro modo, si se riega bien difícilmente se abonará mal.

La práctica del riego debe de tender a satisfacer las necesidades hídricas del cultivo aportando, a todas las plantas, la misma cantidad de agua, en la cantidad requerida y en el momento adecuado. Aportar la misma cantidad de agua a todas las plantas depende fundamentalmente del coeficiente de uniformidad del sistema de riego. Por otro lado, la cantidad de agua a aportar está en función de las características físicas del suelo-almacén y de las propuestas de manejo; una de ellas se refiere al porcentaje de drenaje o lixiviación, ligado a la salinidad del agua de riego; la otra se refiere al porcentaje de agotamiento del agua del suelo que se permitirá antes de un nuevo riego. Como se puede apreciar las variables que determinan la dotación de riego están ligadas a la parcela y son estables en el tiempo, por lo tanto la dotación de riego debe de ser constante. La frecuencia con que se realice la reposición del agotamiento hídrico producido en el suelo dependerá del consumo realizado por el cultivo. Este consumo es dependiente del clima que rodea a la planta y del coeficiente de cultivo (K_c). Estos factores son variables en el tiempo, por lo que la frecuencia de riego debe de ser variable.

En definitiva, una buena práctica del riego aconseja mantener constante la dotación de riego y variar su frecuencia según varíen las necesidades hídricas del cultivo. El objetivo es mantener constantes las condiciones de humedad, y por lo tanto de conductividad, en los distintos perfiles del suelo, tal y como se pretende mostrar en la Figura 1, en donde los perfiles de alta humedad y baja CE están próximos al punto de emisión del gotero y los perfiles con menor contenido hídrico y mayor CE se encuentran en la periferia del bulbo húmedo. Con este manejo se busca que los distintos tipos de raíces que conforma el sistema radicular de la planta se adapten a las distintas condiciones físicas del suelo y que esas condiciones físicas permanezcan lo más estables posibles, y sin cambios bruscos, durante todo el desarrollo del cultivo.

Figura 1. Distribución teórica de la humedad y de la CE en los distintos perfiles del suelo con dotaciones de riego constantes



1.2. Aplicación de la Solución Nutritiva

Resuelto el problema del manejo del riego la atención hay que centrarla en resolver el problema de la nutrición. Existe numerosa bibliografía respecto a las soluciones nutritivas que satisfacen las necesidades de los cultivos hortícolas. No es objeto de este artículo profundizar en esta cuestión. No obstante, cuando se elige una solución nutritiva (SN) como la más adecuada para un cultivo determinado, hay que acomodar dicha SN a las condiciones de parcela. Los factores determinantes en esta acomodación son, por orden de importancia, la composición iónica del agua de riego y su CE, las características de la variedad y si se cultiva en suelo o sobre sustrato. Decidida la SN a aportar se ajusta y se calcula para, finalmente, prepararla y aplicarla en función de los medios disponibles. En esta publicación, no se contemplan todas las posibles formas de aplicación de las soluciones nutritivas. Se han obviado, por ejemplo, los sistemas que trabajan inyectando a tanque de mezcla o el denominado sistema de balseta, que trabaja la SN directamente a concentración de gotero, o los sistemas que trabajan por control volumétrico. Las situaciones que se contemplarán en los siguientes apartados son:

- Aplicación de la SN con abonadora.
- Aplicación de la SN con Venturis y control manual de la inyección.
- Aplicación de la SN con Venturis y control de la inyección por medición de la CE.
- Aplicación de la SN con Venturis y control de la inyección por medición de la CE y del pH.

1.2.1. Ajuste y cálculo de la solución nutritiva

Aunque el objeto fundamental del artículo está centrado sobre la aplicación de la SN, se tratará brevemente en este apartado sobre el ajuste y cálculo de la misma. La metodología aplicada puede consultarse más ampliamente en García y Moreno (2010). La Tabla 1 recoge un ejemplo de SN muy estandarizada, para un agua de tipo medio, válida para aplicar tanto a suelo como a sustrato y para cultivos de vigor medio.

Tabla 1. Ajuste y cálculo de la SN aportada

Agua de Riego			CE =	0,8 dS m ⁻¹			1,5	3,0	2,0	1,5	1,3		2,5	
mg l ⁻¹	Abonos	Peso molecular		mmol l ⁻¹	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	Ca ⁺⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	NH ₄ ⁺	Na ⁺
* 129	H ₃ PO ₄	73 %	* 86	1,5		1,5		-1,5						
* 83	HNO ₃	56 %	* 83	1,0	1,0			-1,0						
540	Ca(NO ₃) ₂		216	2,5	5,5					2,5			0,5	
606	KNO ₃		101	6,0	6,0						6,0			
25	Micros	8 %	* 13	2,0										
SN en gotero			CE = 2,0 dS m ⁻¹		12,5	1,5	1,5	0,5	2,0	4,0	6,0	1,3	0,5	2,5

Las particularidades más sobresalientes del método seguido son:

- Las concentraciones están expresadas en mmol L⁻¹.
- La cantidad de H⁺ aportado por los ácidos aparece en la columna de los bicarbonatos, con signo negativo, para que quede constancia de los bicarbonatos que se destruyen.
- El valor que aparece en la columna de los pesos moleculares para los ácidos es en realidad el «volumen molecular» del ácido comercial que

se muestra. Por ejemplo, para el ácido fosfórico del 73 % de riqueza y una densidad de 1,55 *129 son los $\mu\text{L L}^{-1}$ de ácido que hay que aportar para obtener 1 mmol L^{-1} de ácido puro. Por la misma razón, en la columna de mg L^{-1} , *83 son los $\mu\text{L L}^{-1}$ de ácido nítrico del 56 % de riqueza que hay que aportar para obtener en la SN 1,5 mmol L^{-1} de ácido nítrico puro.

- El valor que aparece como peso molecular en la fila de los micronutrientes (*13) se refiere en realidad a las partes por millón (ppm) de producto comercial que hay que aportar para obtener 1 ppm de hierro de un complejo de micronutrientes que tenga en su composición, entre otros, un 8% de hierro. En este caso se quieren aportar 2 ppm de Fe y este es el valor que aparece en la columna de « mmol L^{-1} ».
- El peso molecular del nitrato cálcico, se corresponde con el de la fórmula química simplificada $(\text{Ca}(\text{NO}_3)_2)$, siendo la formulación del producto comercial $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \cdot 0,2(\text{NH}_4\text{NO}_3)$, y aportando por cada mmol de Ca^{++} , 2,2 mmol de NO_3^- y 0,2 mmol de NH_4^+ .
- La conductividad eléctrica de la solución nutritiva está calculada dividiendo los meq L^{-1} aportados por los fertilizantes, sin contar los hidrogeniones, entre 9 y sumándole a este valor el de la CE del agua de riego medida con conductivímetro.

La SN queda así ajustada y calculada para preparar un litro de la misma (ver columna de la izquierda « mg L^{-1} »). En los siguientes apartados, y dependiendo de la forma de aplicación, se calcularán las cantidades de fertilizantes necesarias para cada uno de los ejemplos mostrados. La forma de ajuste y cálculo empleada está especialmente pensada para preparar soluciones nutritivas que se concentran «n» veces para luego ser diluidas «n» veces. Esta forma se la conoce como SN 50-50 puesto que, los abonos calculados, se ponen en dos depósitos de fertilizantes y se inyectan en una misma proporción al objeto de obtener en gotero la SN propuesta. Debe de evitarse mezclar los abonos que tienen calcio con los que tienen sulfatos, o fosfatos, para que no se produzcan precipitaciones. La preparación de la SN 50-50 es mucho más recomendable que la de poner cantidades fijas de fertilizantes en depósitos individuales para programar porcentajes distintos de inyección según la SN que se quiera obtener.

1.2.2. Aplicación de la SN con abonadora

El no disponer de un equipamiento sofisticado de fertirrigación no debe de presuponer la renuncia a realizar una correcta operación de fertirriego. Con la abonadora tradicional, como la contemplada en la Figura 2, es perfectamente factible aplicar la solución nutritiva con los criterios que aquí ya han quedado reflejados. Para este caso, las cantidades de fertilizantes que se ponen en la abonadora, no se calculan teniendo en cuenta la superficie a regar, sino la dotación volumétrica que se va a aplicar. Por ejemplo, en una parcela de cultivo de 5.000 m² de superficie que tiene ramales portagoteros a 1 m y goteros de 3 L h⁻¹ insertados a 0,5 m, en la que se dan riegos de 40 minutos, le corresponderá una dotación volumétrica de 20.000 litros. Los cálculos realizados pueden ser contrastados con la lectura de un contador de agua dispuesto en el cabezal para corroborar la bondad de los mismos. Determinada la dotación de riego se calculan las cantidades de fertilizantes a incorporar en la abonadora multiplicando por 20.000 L, y dividiendo entre un millón, los mg L⁻¹ de cada fertilizante. Por ejemplo, para el potasio, daría 12,1 Kg ($606 \times 20.000 / 1.000.000$).

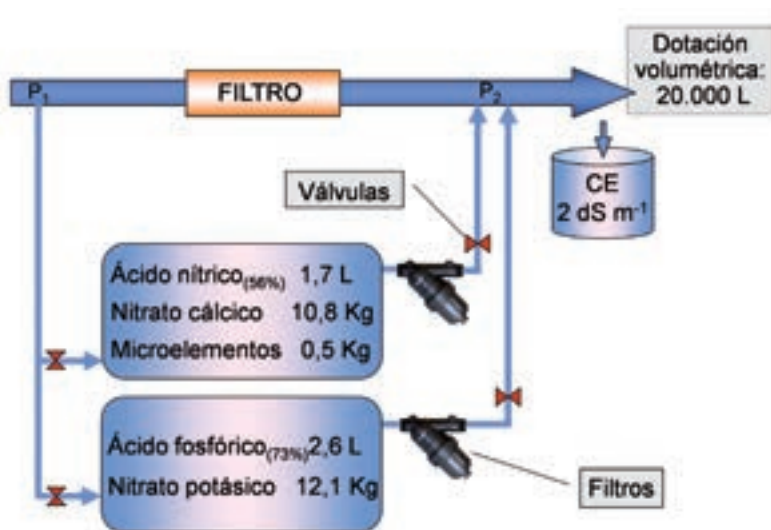
Figura 2. Abonadora



La Figura 3 muestra los distintos componentes básicos que forman este tipo de instalación. Es costumbre generalizada la de utilizar una única abonadora y, en caso de tener que aportar calcio, además de fosfatos y/o sulfatos, dividir la operación de abonado en dos veces para cada riego o aportar en un

riego el calcio y en otro riego los fosfatos y/o sulfatos. Dado el bajo precio de este elemento es recomendable disponer de dos abonadoras y aportar la SN completa en cada riego. La diferencia de presión que debe de existir entre P_1 y P_2 , para que se establezca el circuito hidráulico de inyección de los fertilizantes, puede ser conseguida por el estrangulamiento de una válvula intercalada entre estos dos puntos o por la diferencia de presión que originen los filtros del cabezal de riego, tal y como se muestra en el esquema.

Figura 3. Aplicación de la SN con abonadora tradicional



Una de las desventajas que se le atribuyen a este sistema es la falta de homogeneidad en la distribución del abonado. Es cierto que al inicio de la aplicación se aporta mucho más abono que al final y que la CE a lo largo del riego no es uniforme. En este caso, lo que realmente importa es controlar que, al final del riego, se ha obtenido la CE prevista. El volumen de suelo ocupado por la rizosfera es lo suficientemente grande como para homogeneizar estas desviaciones en la aplicación de la SN. Si la operación de riego se realiza correctamente, ajustando dotación y frecuencia, y se aplica la SN en función del agua aportada, este método proporciona igual calidad, en la operación de fertirriego, que el más sofisticado. El mayor inconveniente es que no puede automatizarse la aplicación de los fertilizantes y cada riego exige la presencia física del usuario.

Una alternativa a este sistema es la disposición de dos depósitos abiertos conectados a la aspiración de la bomba de riego. En este caso hay que asegurarse que la bomba de riego este fabricada con materiales resistentes a la acción de los ácidos y en caso contrario, obviar el uso de los mismos. También hay que vigilar de cerrar las llaves de paso antes de agotar la SN de los depósitos para evitar que entre aire en la aspiración de la bomba.

1.2.3. Aplicación de la SN con Venturis y control manual de la inyección

Esta forma de aplicación de la SN es un escalón natural en el proceso de adquisición y adopción de medios y conceptos entre la abonadora tradicional y los equipos más complejos para la fertirrigación. Para aquellos agricultores que antes de poner el equipo de fertirrigación trabajan manualmente con los Venturis les es mucho más fácil la adaptación a los autómatas de riego porque entienden mejor los mecanismos de actuación de estos.

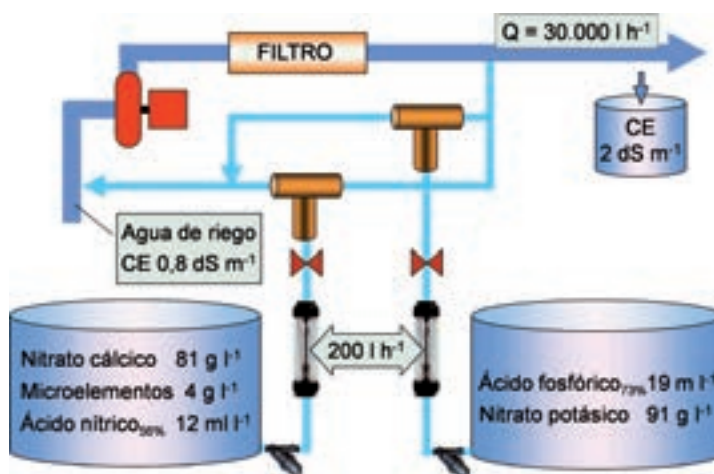
El ejemplo que se desarrolla en este apartado y los siguientes es para la misma SN que se mostró en la Tabla 1. Para calcular las cantidades a aportar en los depósitos se ha concentrado la SN 150 veces. Se ha querido huir del estándar de concentrar la SN 100 veces. Es una manera de sacar mayor rendimiento a la capacidad de los depósitos. Es sabido que la concentración a la que puede llegarse en la preparación de la SN, sin que se produzcan precipitaciones, está relacionada con los productos de solubilidad de las distintas sales que se aportan, o puedan formarse, y de la temperatura. En este caso concreto, en que se trabaja con dos depósitos, y en uno de ellos estarán los sulfatos, el límite de concentración estará determinado por la concentración del sulfato potásico que es la sal menos soluble de las manejadas en fertirrigación. La solubilidad del sulfato potásico a 20 °C es de 110 g L⁻¹. Para mantener un amplio margen de seguridad y evitar la precipitación es aconsejable evitar concentraciones que superen el 50 % de este valor, lo que dará un máximo de concentración de 60 g L⁻¹. Teniendo en cuenta estas consideraciones, y para la amplia gama de aguas de riego manejadas en la zona de cultivo del sureste peninsular, casi todas las SN pueden ser concentradas en verano hasta 200 veces y en invierno hasta 150 veces. Solo en el caso de manejar aguas de baja CE y soluciones nutritivas muy cargadas iónicamente, que demandarán un aporte importante de sulfatos de magnesio y potasio, habrá que concentrar por debajo de los valores mencionados.

La Figura 4 muestra un cabezal de riego preparado para aplicar dos soluciones nutritivas con Venturis y ajuste manual de los caudales de inyección a la aspiración de la bomba. Por otro lado, la Figura 5 presenta la disposición de los elementos básicos necesarios para la aplicación de una solución nutritiva para esta situación. Las cantidades de fertilizantes están calculadas multiplicando la concentración en mg L^{-1} que aparece en la Tabla 1, por el número de veces que se concentra la SN y dividiendo el resultado entre 1.000 para obtener la concentración en g L^{-1} o kg por cada 1.000 l de solución madre. Para el caso del nitrato potásico son 91 g L^{-1} o $91 \text{ kg por } 1.000 \text{ L}$ $[(606 \times 150)/1.000]$.

Figura 4. Inyección con Venturis y ajuste manual



Figura 5. Incorporación de la SN concentrada «n» veces (150) con ajuste manual del caudal de inyección



Si la SN se concentra 150 veces, cuando se inyecte, habrá que diluirla 150 veces para obtener en gotero la SN propuesta. Para realizar esta operación correctamente habrá que conocer el caudal instantáneo del sector de riego. Para el supuesto de tener, como en el caso anterior, una parcela de cultivo de 5.000 m² de superficie, con goteros a 1 m x 0,5 m de 3 L h⁻¹ cada gotero, el caudal instantáneo será de 30.000 L h⁻¹ (5000 x 2 x 3). Como se ha concentrado la SN 150 veces, el caudal de inyección debe de ser 150 veces menor que el caudal de riego, es decir, que habrá que ajustar los Venturis a un caudal continuo de inyección de 200 L h⁻¹ (30.000/150).

Para ajustar los caudales de inyección se utiliza el caudalímetro o rotámetro (Figura 6). Este es un instrumento de medida basado en el principio de Arquímedes y consta de una tubería transparente que se pone en posición vertical y perfectamente aplomada, de sección troncocónica e intercalada en la tubería por la que pasa el fluido cuyo caudal se quiere conocer. Dentro del tubo hay una pieza libre que al paso del fluido es empujada hacia arriba. Conforme esta pieza sube el caudal de paso aumenta, de aquí la forma troncocónica del tubo transparente, hasta que se llega a un punto de equilibrio en que se igualan el empuje y el peso de la pieza flotante. Es muy importante no olvidar que en el momento de equilibrio lo que está midiendo el caudalímetro es la masa de líquido que fluye, no su volumen, de tal forma que cuando en un rotámetro se está leyendo 200, este valor es 200 kg h⁻¹ que equivale a 200 L h⁻¹ solo si el líquido que pasa es agua o cualquier otro que tenga una densidad de 1 kg L⁻¹. Si la densidad no es de 1 kg L⁻¹ habrá que realizar las oportunas correcciones. Por ejemplo para un fertilizante líquido altamente concentrado de densidad 1,3 kg L⁻¹, si en el caudalímetro se lee 200 habrá que interpretarlo como que se están inyectando 154 L h⁻¹ (200/1,3). Si lo que en realidad se quiere inyectar es 200 L h⁻¹, entonces habrá que ajustar el caudalímetro a 260 kg h⁻¹.

Para verificar que la operación de fertirriego se ha realizado correctamente solo hay que hacer un muestreo del volumen de agua de un riego en un gotero, medir la CE y comprobar que es la inicialmente propuesta. También, podremos comprobar que el pH del agua muestreada estará en el entorno de 6, valor que se corresponderá con los bicarbonatos dejados sin neutralizar en la SN ajustada.

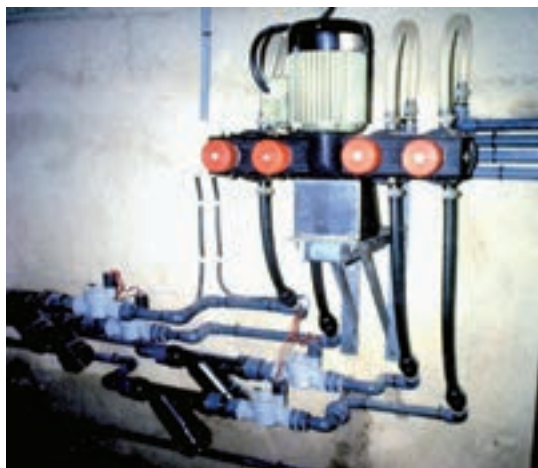
Figura 6. Venturis



La capacidad de inyección de un Venturi está en función de su diseño constructivo, del diferencial de presión entre los dos puntos de conexión hidráulica y de la altura de carga en la aspiración. Conforme se va gastando la SN de los depósitos se apreciará en el caudalímetro que el caudal de inyección también va disminuyendo y por lo tanto se obtendrá una SN en gotero de menor CE a la deseada. Para paliar esta deficiencia se debe de ir corrigiendo el caudal de inyección con mayor o menor frecuencia dependiendo de la presión de funcionamiento de los Venturis, de la altura de los depósitos, de la celeridad con que se produzca el gasto de la SN, etc. Una pauta a seguir puede ser la de corregir los caudales de inyección cuando la CE en gotero se sitúe por debajo del 20 % del valor esperado. Es aconsejable que el recipiente para muestrear la SN del gotero tenga capacidad suficiente para recoger el agua de 4 o 5 riegos para tener un valor medio de la CE obtenida.

La Figura 7 contempla una situación en la que en vez de Venturis el elemento inyector es un grupo de bombeo con varios cabezales de inyección, cuatro en este caso. Estos cabezales disponen de una llave manual que regula el caudal de inyección. Estas bombas trabajan a altas presiones y la altura de carga en la aspiración tiene poca influencia en el caudal de inyección. Tienen como contrapartida una mayor inversión de compra y un mantenimiento más costoso.

Figura 7. Bomba inyectora



1.2.4. Aplicación de la SN con Venturis y control de la inyección por medición de la CE

Los equipos de fertirrigación automatizados están plenamente popularizados. Sin entrar en detalles sobre las distintas formas en que puede ser configurada la operación de riego, desde el punto de vista de la elaboración de la SN, las prestaciones de la mayoría de estos equipos contemplan la automatización de la inyección de los fertilizantes por medición de la CE y la automatización de la inyección del ácido por medición del pH. A pesar de que esto es un estándar, el hecho de que el equipo pueda automatizar el control del pH, no siempre es aconsejable utilizar esta función. Los equipos de fertirrigación funcionan mucho mejor cuando solo tienen que controlar la CE. Si se consigue la SN de gotero con la CE calculada es seguro que el pH también tendrá el valor previsto. Es sabido que dejando en la SN entre 0,5 y 1 mmol L⁻¹ de bicarbonatos sin neutralizar, el pH en la SN de gotero será de 6,0-6,5, valor este más que suficiente para asegurar la ausencia de precipitados de carbonato cálcico en la instalación de riego.

La Figura 8 muestra la disposición de los elementos básicos necesarios para la situación que se describe. Las válvulas manuales son sustituidas por electroválvulas. El ordenador del equipo de fertirriego recibe la señal de la CE leída por una sonda de conductividad estratégicamente situada. El valor de la CE leída se compara con la CE programada en el equipo (punto de consigna) y en función de ello el ordenador envía señales de apertura y cierre a las

electroválvulas hasta conseguir el valor de conductividad programado. Ni que decir tiene que, al igual que ya se ha comentado en el ejemplo contemplado en el anterior apartado, si finalmente se consigue en gotero la CE calculada y programada, $2,0 \text{ dS m}^{-1}$ en este caso, se podrá estar seguro de que el pH también será el previsto puesto que se habrá inyectado todo el ácido (fosfórico y nítrico) que se calculó y aportó en los depósitos de fertilizantes. Para esta situación, si la capacidad de inyección de los Venturis fuera menor de 200 L h^{-1} , las electroválvulas estarían abiertas continuamente y no se conseguiría la CE deseada. Por otro lado, si la capacidad de inyección de los Venturis fuera exactamente de 200 L h^{-1} las electroválvulas estarían abiertas continuamente y en gotero se conseguiría la CE de $2,0 \text{ dS m}^{-1}$. Se deduce que, para este ejemplo, los Venturis tienen que tener una capacidad de inyección mayor de 200 L h^{-1} .

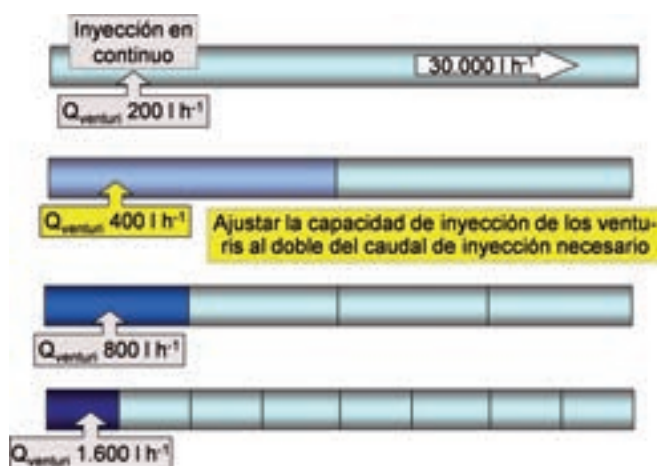
Figura 8. Incorporación de la SN con ajuste automático del caudal de inyección por medición de la CE



En la Figura 9 se contemplan varias situaciones respecto a esta cuestión. El caso ideal es cuando se inyecta en continuo el caudal necesario para conseguir el valor de CE programado. Esto se puede hacer con una válvula motorizada que, al recibir la lectura de la sonda de conductividad, va modificando el caudal de inyección de la válvula. Con ello se consigue una mezcla continua y homogénea, y por lo tanto unos valores estables de CE y pH, en todo el agua tratada. Esta solución es cara y se utiliza fundamentalmente en procesos industriales. Para disminuir costes lo que está estandarizado en los equipos de fertirriego es poner electroválvulas de apertura-cierre, también denominadas

todo-nada. Por ejemplo, si se ajusta el Venturi a una capacidad de inyección de 400 L h^{-1} , en un ciclo, las electroválvulas estarán, el 50 % del tiempo abiertas y el 50 % del tiempo cerradas. Puede apreciarse que hay una mitad del volumen de agua que no recibe fertilizantes y que la otra mitad recibe el doble o sea, que tendrá una conductividad mayor, en este caso de $3,2 \text{ dS m}^{-1}$ (0,8 del agua y 2,4 de los fertilizantes). Si el caudal de inyección del Venturi es de 800 o de 1.600 L h^{-1} este inconveniente se va acrecentando y para el equipo de fertirrigación cada vez le será más difícil ajustar adecuadamente los parámetros de la SN. Si la sonda de conductividad está puesta cerca de los puntos de inyección tomará lecturas poco fiables porque la mezcla no se habrá homogeneizado. Por el contrario, si la sonda está lejos de los puntos de inyección para que tome lecturas cuando la mezcla esté bien homogeneizada, la respuesta del equipo será lenta y con buques de control muy sinuosos. En definitiva, los caudales de inyección de los Venturis se aconseja que sean ajustados al doble de la necesidad de caudal de inyección en continuo. De esta forma pueden ser atendidas puntualmente necesidades nutritivas, o de manejo, en las que se demanden mayores conductividades eléctricas en la SN. La comprobación de que el ajuste está correctamente realizado es fácil de realizar. Cuando el equipo de fertirrigación esté funcionando se han de escuchar los sonidos de apertura y cierre de las electroválvulas de inyección con la misma cadencia el uno del otro respectivamente.

Figura 9. Ajuste del caudal de los Venturis para una inyección con electroválvulas por pulsos de apertura-cierre



La aplicación de los ácidos en los depósitos para ser tratados como fertilizantes, sin usar el controlador de pH del equipo de fertirrigación, es muy recomendable por su facilidad de manejo y el mejor funcionamiento del mismo.

1.2.5. Aplicación de la SN con Venturis y control de la inyección por medición de la CE y del pH

Si se quiere que sea el equipo de fertirriego el que controle el pH, entonces el ácido nítrico se pone en un depósito independiente con un venturi de inyección y una electroválvula de regulación. Una sonda, estratégicamente situada, transmite al controlador del equipo de fertirriego las lecturas de pH. Estos valores son comparados con el pH programado y, en función de ello, son enviadas señales de apertura-cierre a la electroválvula de inyección del ácido para conseguir y ajustar el valor de pH deseado. En la Figura 10 se contempla la disposición de estos elementos. La concentración a la que se ha de poner el ácido nítrico en este depósito solo puede ser resuelta a pie de parcela puesto que la misma dependerá del contenido de bicarbonatos del agua, del volumen de agua a tratar y de la capacidad de inyección del Venturi. Por tanteo se puede averiguar rápidamente la concentración a la que ha de ponerse el ácido. Lo dicho anteriormente respecto a la necesidad de ajustar convenientemente las capacidades de inyección de los Venturis es, en el caso del ácido, de más estricta aplicación. Recordar que en el ciclo de inyección lo mejor es que el tiempo de apertura y el tiempo de cierre de la electroválvula sean iguales. Inicialmente se ajusta el Venturi a un valor de inyección predefinido y se incorpora ácido nítrico en la mitad de agua de la capacidad del depósito destinado para el ácido. Cuando el sector de riego de mayor caudal instantáneo esté ajustando el valor del pH se comprueba la relación, entre el tiempo de apertura y el tiempo de cierre de la electroválvula de inyección de ácido, y se diluye o concentra el ácido hasta que esta relación se iguale. Queda así resuelto el problema de la elección de la concentración del ácido nítrico.

Al programar un valor de pH de 5,5-6,0 en el equipo de fertirriego se estará aportando el nitrato correspondiente y esto ha de ser tenido en cuenta cuando se analice y diagnostique la SN de gotero.

Figura 10. Incorporación de la SN con ajuste automático de los caudales de inyección por medición de la CE y del pH



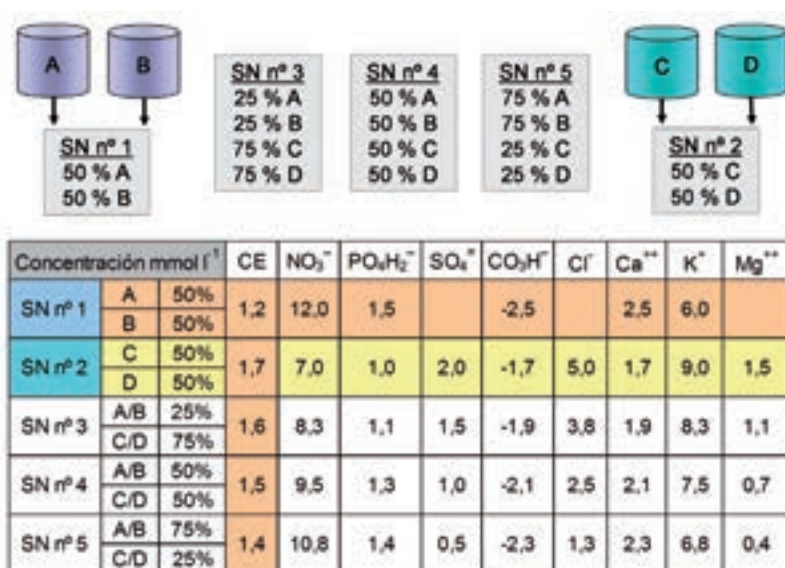
1.3. Mezcla de soluciones nutritivas

En el apartado 2.1 «Ajuste y cálculo de la solución nutritiva» se recomienda la preparación de la misma por el sistema aquí denominado 50-50. Queda por lo tanto explícitamente desaconsejado el sistema consistente en tener cada abono en un depósito independiente, a concentraciones fijas, para programar distintos porcentajes de inyección según la SN que se quiera obtener. La principal ventaja del primero sobre el segundo es la facilidad con que puede ser controlada la bondad de funcionamiento del equipo de fertirrigación. El usuario comprobará que la CE en gotero es la prevista, ha de verificar que el gasto de fertilizantes en los depósitos es parejo. Así tiene la seguridad de que la SN obtenida es la inicialmente calculada. Si se observa que en los dos depósitos el nivel de la SN no es el mismo lo más cómodo y rápido será reprogramar los porcentajes de inyección. Por tanteo, y según apreciación del usuario, se puede poner, por ejemplo, en vez de 50-50, 45-55. Hay que asegurarse que en los dos depósitos la SN se va consumiendo al mismo tiempo.

Las ventajas que se le atribuyen al sistema de preparación de la SN con abonos a concentraciones fijas y en depósitos independientes suelen ser ficticias. La utilidad que se considera más relevante es la de poder preparar múltiples soluciones nutritivas en tiempo real para poder atender múltiples po-

sibilidades nutritivas. Solo se podrá conseguir este objetivo si realmente cada fertilizante está en un depósito, Para ello se necesitarían aproximadamente unos ocho depósitos. Si no se tiene suficiente número de depósitos algunos fertilizantes tendrán que ir mezclados con otros. En este supuesto, que es el más común, ya no se podrá tener el margen de maniobra que el método pretende puesto que la aplicación de uno estará supeditada a la del otro. Asimismo las demandas nutritivas de las hortalizas no son tan complejas como para tener la necesidad de tanta variabilidad. Las posibilidades de manejo con soluciones nutritivas 50-50 son mucho más amplias de lo que parece. Dos soluciones nutritivas 50-50, elegidas adecuadamente y mezcladas convenientemente, dan margen de maniobra más que suficiente para atender todas las posibles necesidades que puedan aparecer en una explotación hortícola. En la Figura 11 se muestra un ejemplo ilustrativo de ello.

Figura 11. Mezcla de dos SN (50-50) para obtener múltiples SN



En los tanques A-B está la SN 1 que se contemplaba en la Tabla 1. Esta es una SN típicamente vegetativa para cultivos de vigor medio. También puede ser válida para fases vegetativas de cultivos vigorosos si se aumenta la CE entre un 10 y un 20 %, por ejemplo. Para los tanques C-D se ha preparado la SN 2 que es una SN muy generativa, con poco nitrato y un buen nivel de

potasio y en la que, además, se ha añadido magnesio y cloruro. Esta SN puede ser apropiada para maduración de melón o sandía, para terminar un cultivo de tomate, para «sujetar» cultivos muy vigorosos etc. Estas dos soluciones nutritivas, que podrían denominarse «madres», han de diseñarse en función del agua de riego, de los cultivos a implantar y de las características del suelo o sustrato en donde se vaya a cultivar. A partir de aquí, mezclándolas con acierto y eligiendo las conductividades eléctricas adecuadas, pueden obtenerse suficientes soluciones nutritivas como para atender situaciones intermedias para todo tipo de cultivos hortícolas. En la tabla aparecen tres muestras de las múltiples posibilidades de mezclas que pueden realizarse. Por ejemplo, la SN 3 se obtiene por la mezcla de un 25 % de la SN 1 y un 75 % de la SN 2. La forma de operar para su cálculo es, para el nitrato por ejemplo:

- Nitrato aportado por la SN 1 $12 \times 0,25 = 3,00$
- Nitrato aportado por la SN 2 $7 \times 0,75 = 5,25$
- Nitrato en la SN 3 $3 + 5,25 = 8,25$

Son operaciones sencillas que, trasladadas a una hoja de cálculo, permiten especular con numerosos supuestos de manera fácil y rápida y que son una importante ayuda para la toma de decisiones. No hace falta decir que, para el supuesto de utilizar una hoja de cálculo, se deben de introducir en la misma los datos analíticos del agua de riego para que los cálculos sean más completos.

1.4. Control de la fertirrigación

Todo proceso de fertirrigación, para un cultivo hortícola, debe de contemplar mecanismos de control que permitan la verificación de que el proceso se ha realizado correctamente. Existen equipamientos más o menos sofisticados para la realización de estas tareas. Para la mayoría de las explotaciones hortícolas, con cultivos en suelo, un modelo de control como el mostrado en la Figura 12 es tan necesario como suficiente. Para cada cultivo, o sector de riego, hay que elegir una zona que sea lo más representativa de las condiciones climáticas y edafológicas en las que se desarrolla el cultivo. En esta zona se elige un único ramal portagoteros. Bajo un gotero de este ramal se pone un recipiente para recoger el agua de cada riego. Cerca de este punto se ponen los tensiómetros y también, cerca de ellos, se pone la sonda de succión.

Figura 12. Control del proceso de fertirrigación



Del agua de riego recogida se cuantifica el volumen de agua y se comprueba que coincida, aproximadamente, con el volumen teórico que debería de aportar el gotero en función del tiempo de riego programado y del caudal nominal del gotero (generalmente 3 L h^{-1}). También en este agua se mide la CE y se comprueba que es la programada admitiéndose no más de un 10 % de variación. Para cultivos en suelo el pH no es preciso verificarlo con la misma frecuencia que la CE. Aplicando la SN de cualquiera de las formas aquí contempladas es suficiente comprobar, semanalmente por ejemplo, el valor del pH en gotero. Dado que los peachímetros son instrumentos caros y de difícil mantenimiento, se puede comprobar el valor del pH ayudándose de tiras de papel indicadoras de pH como las mostradas en la Figura 13.

Dos son las características físicas que definen a un tensiómetro, su longitud y la amplitud de la escala de medida. Para cultivos hortícolas son recomendables los tensiómetros de 15 y 30 cm de longitud (6" y 12" respectivamente) y con escala de medida entre 0 y 40 cb. Los tensiómetros se instalan dentro del bulbo húmedo de la zona de goteo, a unos 15 cm equidistantes de la planta y del gotero. Para obtener lecturas exactas debe de haber un buen contacto entre la porcelana porosa y el suelo. En suelos sin piedras y estando en capacidad de campo el tensiómetro de 15 cm se coloca sin mayores problemas empujándolo firme y verticalmente, sin cogerlo por el vacuómetro. Para

colocar el tensiómetro de 30 cm habrá que ayudarse de un palo o tubo, que tenga un diámetro un poco menor que el diámetro del tensiómetro, marcando la profundidad a la que ha de llegar la porcelana porosa para evitar que quede aire entre esta y el suelo. Colocados los dos tensiómetros, han de quedar unos 2 cm de separación entre los vacuómetros y el suelo.

Figura 13. Papel indicador de pH



Las lecturas del tensiómetro de 15 cm, que estará en la zona de máxima concentración de raíces, se recomienda que oscilen entre 10 y 25 cb. Este tensiómetro informa de si la frecuencia de riego elegida es la correcta. Por ejemplo, si se riega en días alternos y antes de empezar el riego el tensiómetro marca 35 cb, está informando que quizás haya que regar todos los días. Por el contrario, si el valor de tensión es de 8 cb es indicativo de que hay que ampliar la frecuencia a un riego cada tres días. Los tensiómetros de 30 cm miden la tensión del agua del suelo por debajo de la rizosfera. Puede decirse que actúan como lisímetros. Los niveles de tensión que debe de leer este tensiómetro tiene un menor margen de oscilación. Como norma general, entre 8 y 12 cb

son valores recomendables para un correcto manejo del riego. La lectura del tensiómetro de 30 cm informa de si la dotación de riego aportada es la adecuada. Por ejemplo, si antes del riego el vacuómetro indica una tensión de 10 cb y después del riego la tensión queda próxima al valor cero, y permanece este valor durante un tiempo prolongado, es seguro que la dotación de riego es excesiva. Por el contrario, si partiendo del mismo supuesto, después del riego, la tensión apenas baja de los 10 cb es indicativo de que la dotación es escasa y se corre el riesgo de que se pueda producir una acumulación salina en la rizosfera. Si paralelamente se produce un aumento de CE en la SN de la sonda de succión es señal evidente de que no se ha producido lavado de sales fuera de la rizosfera.

También, y siguiendo la metodología descrita por Lao (2011), se mide la CE de la sonda de succión para cada riego que se aplique. Este valor, junto con las lecturas de los tensiómetros, permiten diagnosticar la bondad del proceso de fertirrigación y ayudan a tomar decisiones sobre las posibles modificaciones a realizar en el mismo. Generalmente la CE en sonda es superior a la CE en gotero. La diferencia entre estos dos valores dependerá por un lado de la carga iónica de la SN y por el otro del porcentaje lixiviación manejado. Cuando un ión es aportado por encima de la concentración de absorción del cultivo su concentración aumenta en la rizosfera. Cuando un ión es aportado por debajo de la concentración de absorción del cultivo su concentración disminuye en la rizosfera. En la Tabla 2 se muestran las concentraciones de absorción de varios cultivos según datos de Sonneveld (2005) y Magán (1999).

Tabla 2. Concentraciones de absorción para cultivos en Holanda y Almería. En mmol L⁻¹

Cultivo	NO ₃ ⁻	PO ₄ H ₂ ⁻	SO ₄ ⁻	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	Na ⁺
Tomate (Holanda)	9,6	1,1	1,2	6,1	2,2	0,9	0,6-1,0	0,4-0,8
Pepino (Holanda)	12,2	1,0	0,9	6,6	2,7	0,8	0,3-1,5	0,3-1,0
Pimiento (Holanda)	9,7	0,8	0,6	4,5	1,9	0,7	0,3-0,6	0,2-0,3
Tomate (Almería)	8,0-14,0	1,3-1,5	0,5-1,5	4,0-8,0	1,8-3,0	0,8-1,2	0,8-4,5	0,5-4,0

Fuente: Sonneveld (2000) y Magán (1999).

Los nutrientes que el cultivo necesita, que son sales, no lo olvidemos, aportan una CE que puede definirse como *CE nutritiva*. Con esta CE no se debe de especular puesto que irá en detrimento del correcto desarrollo del cultivo. En determinadas situaciones, y por necesidades de manejo para el

control del equilibrio vegetativo-generativo de la planta, es preciso una mayor CE en la rizosfera del cultivo de la que se está obteniendo con la *CE nutritiva*. Para conseguirlo se puede manejar un menor porcentaje de lixiviación, incluso trabajar con un determinado porcentaje de déficit hídrico. También puede conseguirse el mismo efecto trabajando con el régimen hídrico demandado por el cultivo pero aportando un extra de sales fertilizantes. La CE aportada por estas sales-fertilizantes puede ser definida como *CE de manejo*. Estas sales extras nunca deben de ser abonos nitrogenados.

A la vista de los datos de la CE de la SN de gotero, de la CE de la SN de la sonda de succión y de los valores mostrados por los tensiómetros colocados a 15 y 30 cm de profundidad se toman las decisiones respecto al manejo de la fertirrigación. No se debe de tratar de corregir las programaciones continuamente para intentar ajustarse estrictamente a lo programado. Para introducir modificaciones en los parámetros de fertirriego deben de encontrarse tendencias claras en las desviaciones de los objetivos programados teniendo en cuenta al menos los datos de 3 días.

Para realizar un control más estricto sobre la nutrición del cultivo se toman muestras de la SN de la sonda de succión y de la SN de gotero y se envían al laboratorio para su análisis. Es difícil de determinar que cantidad de muestras hay que realizar a lo largo de un cultivo. En general con 2 o 3 análisis deben de ser suficientes. Analizar la SN de gotero servirá para, asegurarse de que la SN calculada es realmente la que se está aportando al cultivo, detectar posibles cambios en la composición iónica del agua de riego y verificar la bondad en el funcionamiento del equipo de fertirrigación. Aplicando la SN con 2 depósitos al 50-50 y conseguida la CE propuesta, los datos del análisis de la SN de gotero han de cumplir las siguientes condiciones:

- La suma de aniones y cationes (en meq L⁻¹) deben de ser iguales ($\pm 10\%$).
- La suma de aniones o cationes (en meq L⁻¹) divididos entre 10 debe de ser aproximadamente igual al valor de la CE (dS m⁻¹).
- Si no se aporta Cl, Na y/o Mg, en la SN de gotero debe de haber la misma cantidad de estos elementos que en la del agua de riego.
- La concentración de Ca será igual a la del agua de riego más lo aportado (CaNO₃).
- Las concentración de nitrato será igual a la del agua (si fuera el caso) más lo aportado (ácido nítrico y/o nitratos de calcio, potasio y amonio).

- Las concentración de K será igual a la del agua (si fuera el caso) más lo aportado (fosfato monopotásico, nitrato potásico, sulfato potásico y/o cloruro potásico).

Tradicionalmente, y desde un punto de vista nutricional, se han valorado los suelos basándose en el análisis de los elementos solubles obtenidos en el extracto de la pasta saturada del suelo. Existe numerosa bibliografía, basada en la experimentación, que permite diagnosticar la SN del extracto de la pasta saturada. Para saturar el suelo se utiliza agua destilada. La cantidad de agua destilada necesaria para obtener la pasta saturada es aproximadamente el doble de la que el suelo contiene en el punto capacidad de campo. Un suelo de textura media, en capacidad de campo, retiene el agua a una tensión de 15-25 cb y siempre se ha dado por bueno que, en ese momento, las condiciones son óptimas para un correcto desarrollo del cultivo. Cada vez con mayor intensidad se piensa, que la obtención por succión a 40-50 cb de agua libre del suelo, dará una muestra más representativa del estado en que el sistema radicular de la planta encuentra los nutrientes en el suelo. Lo que a día de hoy se está echando en falta, por parte del agricultor y del asesor técnico, es suficiente información, obtenida desde la investigación, sobre los parámetros de la SN de la sonda de succión para realizar un correcto diagnóstico del estado nutricional del suelo.

Con fines puramente de manejo del cultivo, los datos más relevantes del análisis de la sonda de succión son la CE y las concentraciones de nitratos y potasio. Esta afirmación se basa en los siguientes hechos. Los valores de cloruros y sodio encontrados en el suelo están muy ligados a las concentraciones aportadas por el agua de riego. Casi todas las aguas de riego aportan cloruro sódico por encima de la tasa de absorción del cultivo. Quiere decirse que siempre se encontrará más cloruro y sodio en la SN de la sonda que en la del gotero. Esta diferencia se acrecentará conforme la concentración de cloruro sódico en el agua de riego sea mayor y menor sea el porcentaje de lixiviación. En suelos calizos las fuentes de calcio y magnesio son casi inagotables, esto, unido a los aportes del agua de riego, hace que difícilmente se encuentren en la SN de la sonda valores de concentración de estos cationes por debajo de lo aportado. Las especiales características de la disociación del ácido fosfórico, en función del pH, hacen que el anión fosfato se encuentre siempre a muy bajas concentraciones en un medio alcalino. Esto no ha de significar que se

aumente la concentración de aporte. Para el fosfato solo hay que asegurarse que la concentración en gotero es la prevista.

Nitrato y potasio son finalmente los elementos sobre los que realizar la valoración del estado nutricional del cultivo. Lo que determina la focalización del problema nutricional sobre estos dos nutrientes es que, la planta los necesita en cantidades importantes, en las aguas de riego, normalmente, no se encuentran y los suelos no tienen muchas reservas de ellos. Son elementos muy móviles en el suelo y percolan con facilidad a capas profundas, lejos de la rizosfera. Si no se manejan con cuidado y precisión, además de suponer un quebranto económico, su exceso resulta, para el caso de los nitratos, un peligroso contaminante de las aguas subterráneas. Siempre será deseable que las concentraciones de estos elementos en la SN de la sonda de succión sean menores que las concentraciones en la SN de gotero. Si se pretende especular en exceso para maximizar este objetivo será necesario hacer muestreos con mayor frecuencia. En la Tabla 3 aparecen distintas analíticas realizadas en cultivos comerciales. Todos ellos se desarrollaron bien y sus producciones comerciales fueron muy competitivas. Las concentraciones de nitratos y potasio en la SN de gotero están dentro de los estándares recomendados para cultivos en suelo. Para el potasio las concentraciones en gotero están más ajustadas, quizás demasiado para los pimientos minis, a la vista de los resultados en sonda. Ello demuestra, una vez más, que las plantas tienen una gran capacidad de adaptación a una amplia gama de situaciones, en este caso nutricionales. También se demuestra, que en el proceso de la fertirrigación, el manejo del agua es el factor determinante y que regando bien, la planta se nutrirá bien.

**Tabla 3. Datos analíticos de soluciones nutritivas de gotero y sonda de succión
(CE en dS m⁻¹ y concen-traciones en mmol L⁻¹)**

Cultivo	Análisis	C. E.	NO ₃ ⁻	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	Cl ⁺
Otoño 2001	Gotero	2,3	11,3	9,0	4,5	2,0	2,6	8,2
Tomate «ramo»	Sonda	2,9	17,7	6,5	7,6	4,4	3,5	12,5
Otoño 2005	Gotero	2,5	6,3	5,4	3,4	2,7	6,7	10,7
Pimiento «italiano»	Sonda	2,9	6,8	5,6	4,5	3,1	8,1	13,0
Otoño 2010	Gotero	2,8	7,9	4,3	3,6	5,2	4,8	10,1
Pepino «francés»	Sonda	3,2	8,9	3,2	5,9	5,9	6,1	10,2
Otoño 2011	Gotero	3,1	11,9	5,7	4,0	5,8	5,7	6,9
Pepino «Almería»	Sonda	3,0	2,6	0,9	6,2	6,9	7,0	9,5
Otoño 2011	Gotero	2,2	7,6	2,5	3,3	2,3	7,6	7,6
Pimiento «mini»	Sonda	3,6	2,4	0,4	7,5	3,7	15,0	19,3
Otoño 2012	Gotero	2,3	8,3	3,1	3,9	2,5	5,0	8,5
Pimiento «mini»	Sonda	2,9	4,2	0,8	4,2	3,5	12,8	16,0

Referencias bibliográficas

- GÁCIA LOZANO, M. y MORENO INIESTA, T. (2010): «Fertirriego en Horticultura sin Suelo. Aspectos prácticos»; *Diez años de Mejora en la Fertirrigación de los cultivos sin Suelo*. Granada, Caja Rural de Granada; pp. 7-43.
- LAO ARENAS, M. T. (2012): «Uso de sondas de succión para el manejo del fertirriego en horticultura intensiva»; en *VII Seminario Técnico Agronómico: Mejora en la eficiencia del uso de Agua y Fertilizantes en Agricultura*. Almería, Fundación Cajamar.
- MAGÁN CAÑADAS J. J. (1999): «Sistemas de cultivo en sustrato, a solución perdida y con recirculación del lixiviado»; en FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ, M. y CUADRADO GÓMEZ, I. M.: *Cultivos sin Suelo II. Curso Superior de especialización*. Almería, Dirección General de Investigación y Formación Agroalimentaria, FIAPA y Caja Rural de Almería; pp. 173-205.
- MARTÍNEZ GARCÍA, F. P. *et al.* (2010): «El control del fertirriego en los cultivos sin suelo»; *Horticultura Global* (290); pp. 12-19.
- MORENO INIESTA, T. (2004): «Equipos para la fertirrigación y manejo de soluciones nutritivas»; *Vida Rural* (185); pp.70-75.

SONNEVELD, C. (2005): «La nutrición mineral y salinidad en los cultivos sin suelo: su manejo»; en URRESTARAZU GAVILÁN, M.: *Tratado de Cultivos sin Suelo*. Almería, Mundiprensa; pp. 305-367.

Planteamiento y gestión de soluciones nutritivas en cultivos hortícolas

Antonio L. Alarcón Vera

Universidad Politécnica de Cartagena

1. Prioridades en agricultura intensiva

La producción de cualquier cultivo es consecuencia de la acción sinérgica de innumerables factores que interactúan a través del tiempo y del espacio, dando como consecuencia unos malos o buenos rendimientos, con alta o baja calidad de los productos cosechados.

Lo primero que hay que tener claro a la hora de afrontar un cultivo bajo fertirriego, es el hecho de que la diferencia respecto a un cultivo convencional radica en el control hídrico y nutricional que podemos ejercer en el sistema radicular de la planta (la mitad oculta), pero siendo esto de una importancia vital, de nada sirve si no se afrontan adecuadamente y se cuidan al máximo el resto de factores. Esto no quiere decir que el control de la nutrición del cultivo no sea un factor esencial, que evidentemente lo es, pero el éxito radica en poner todos los medios para que una correcta nutrición pueda desplegar todo su potencial productivo.

En todo proceso a desarrollar, y mucho más en la agricultura de máxima especialización como son los cultivos bajo fertirrigación, con un determinado material vegetal seleccionado con sus características genéticas específicas, existe un orden de prioridades que condicionan o limitan la productividad del sistema, y siempre hay que tener muy claro que la incidencia en el control del cultivo debe también seguir ese orden de prioridad, difícil de lograr, pero que definirá el éxito o fracaso de nuestro proyecto.

Se trata de mantener un cultivo lo mejor controlado que nos permita nuestra infraestructura y tecnología, con el objetivo de obtener la máxima producción de cosechas que cumplan los requisitos de calidad exigidos por el mercado. Algo tan simple ha de tener una priorización clara de los factores que van a condicionar el proceso productivo del cultivo. Este orden de prioridades podría ser el siguiente:

1. *Climatología*: temperaturas (medias y diferencias térmicas); humedad relativa (HR media y evolución diaria); agentes meteorológicos adversos (vientos, granizo, lluvia intensa); radiación incidente (cantidad y calidad de luz); estacionalidad; nivel de CO₂, etc. Los métodos de control, además de elegir materiales vegetales adaptados a las condiciones climáticas de cada zona y época, pasan por la instalación de estructuras protegidas (invernaderos, malla de sombreo, acolchados plásticos en el suelo, sistemas de humificación, ventilación, calefacción, pantallas térmicas y de sombreo, etc.).

El clima condiciona el desarrollo de la planta mucho más que cualquier otro factor, ya que determina toda la fisiología básica de la planta. Por esa razón, además de elegir materiales vegetales adaptados, la industria de invernaderos y otros sistemas protegidos, progresa. El objetivo es conseguir durante la mayor parte del tiempo unas condiciones ambientales que posibiliten un desarrollo óptimo de los cultivos.

Así, los parámetros climáticos (temperatura, humedad, luz, CO₂), determinan el rendimiento fotosintético, la respiración y la transpiración de las plantas, lo que condiciona el ritmo de crecimiento y la producción de biomasa del cultivo, procesos de polinización, floración, fructificación, etc. Además, enfermedades y multitud de fisiopatías (alguna de las cuales involucra una mala asimilación nutricional), son directamente causadas por situaciones climáticas poco favorables, como *cracking*, aborto de flores y frutos, *blossom end rot*, *blotchy*, coloraciones defectuosas, ahuecado de frutos, etc.

2. *Sanidad*: no hay que escatimar esfuerzos en el control fitosanitario del cultivo, tanto de la parte aérea como en raíz, incidiendo en aquellas plagas y enfermedades que pueden afectar seriamente los rendimientos del cultivo y mucho más cuando existen serios riesgos de transmisión de virus, dada la gran susceptibilidad de las plantas (jóvenes sobre todo) a la infestación. Está claro que interesa siempre contar con materiales vegetales tolerantes o resistentes a los principales problemas fitopatológicos de la zona y época, y que de nada sirve el diagnóstico nutricional en una planta con problemas fitosanitarios. Todo el mundo asume los efectos negativos que plagas y enfermedades puedan causar a un cultivo, la relación causa-efecto es evidente.

Ahora bien, esta relación es más difícil de determinar cuando se trata del grado de incidencia de factores como clima, labores culturales o riego, y a menudo no se adoptan las medidas oportunas para evitar sus efectos negativos.

3. *Labores culturales y de manejo*: preparación del suelo y camas de cultivo, drenajes, mantenimiento y mejora de la estructura del suelo, trasplante, edad y calidad de las plántulas para trasplante, elección de densidad y marco de plantación, podas, tutorados, engués, polinización, aclareos de frutos, bajadas de planta en su caso, recolecciones, etc., son elecciones y actividades que condicionan la productividad del cultivo en una medida mayor que el valor que se les da.

En la gran mayoría de los casos se pueden lograr unos aumentos en los rendimientos mucho más cuantiosos incidiendo sobre estos aspectos que sobre el propio programa nutricional. Además estas actividades son dependientes de decisiones y manejos personales, con lo que resulta crítico el manejo y capacitación de todo el personal implicado.

Especialmente importante son las correctas propiedades físicas de un suelo (estructura), que van a condicionar una serie de parámetros imprescindibles para tener una buena plantación.

Figura 1. Un cultivo protegido bien diseñado y manejado permite maximizar el funcionamiento fisiológico básico de la planta y mantener un mejor rendimiento fotosintético

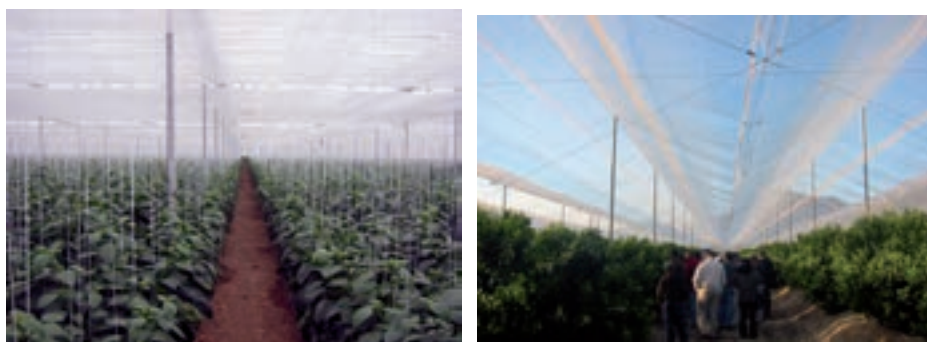


Figura 2. La realización de adecuados drenajes pasa a ser labor prioritaria cuando existen problemas de evacuación de agua sobrante en alguna zona o momento



Figura 3. Asegurar una correcta polinización es básico para una alta producción y calidad



Figura 4. Unas labores culturales de manejo de planta efectuadas correctamente en tiempo y forma, son esenciales para maximizar los rendimientos de un cultivo intensivo



4. *Riego*: ¿de qué sirve el mejor programa nutricional del mundo si no somos capaces de regar bien y tener una adecuada raíz? Recordemos que el agua es el vehículo que pone en contacto los nutrientes aportados con la raíz del cultivo, si no regamos bien es imposible lograr una nutrición correcta, sobre todo, en agricultura intensiva bajo fertirrigación, donde la mayor parte de los nutrientes son aportados disueltos en la solución nutritiva de fertirriego. De esa forma es fundamental contar con un diseño hidráulico y agronómico adecuado, mantener las presiones óptimas de trabajo en la red de riego, disponer de un adecuado sistema de filtrado y establecer unas correctas dosis y frecuencia de riego en cada momento del cultivo.
5. *Nutrición*: una vez llegado a este punto con los puntos anteriores bien trabajados, la nutrición juega un papel fundamental. Si alguno de los puntos anteriores fracasa o no está optimizado, no existen diferencias entre el mejor programa nutricional del mundo y un programa nutricional más o menos aceptable, en ese caso el limitante del cultivo y lo que frena el aumento de la productividad no es el programa nutricional en sí, si no alguna de las prioridades consideradas con anterioridad (que pueden, lógicamente, desencadenar un problema o desequilibrio nutricional, que no se solventa con la modificación del programa nutricional, si no con la mejora del punto limitante).

Por esta razón los cultivos sin suelo o hidropónicos son más productivos, y en ellos la nutrición juega un papel tremendamente im-

portante. En la mayoría de este tipo de cultivos, los puntos anteriores a la nutrición se encuentran perfectamente controlados y optimizados. Y en el mismo sentido, resultaría completamente absurdo plantear un cultivo sin suelo, con todas las ventajas que puede aportar, y limitar su eficiencia por descuidar las prioridades planteadas de forma previa a la nutrición.

Un cultivo sin suelo o hidropónico altamente tecnificado, mantiene por definición un mejor control de los factores previos a la nutrición para que esta funcione. En un cultivo en suelo, su preparación y mantenimiento de unas buenas propiedades físicas se hacen vitales al condicionar el manejo del riego, el desarrollo de la raíz y la consecución de una adecuada relación aire/agua en el entorno radicular.

Además, todo lo anterior debe ir ligado al mercado, no olvidemos nunca que la agricultura es una actividad lucrativa, donde los rendimientos no deben medirse en kg/ha, sino en €/ha, donde la calidad poscosecha de los productos y la elección del mercado en tiempo, producto y cliente, son cruciales para la viabilidad económica de los proyectos agrícolas.

2.2. Manejo y control nutricional en fertirrigación

2.2.1. Enfoque nutricional en fertirriego. Soluciones nutritivas (SN)

El enfoque nutricional en un cultivo tradicional, con riego por surcos o inundación, no es el mismo que se ha de llevar a cabo en fertirrigación.

Para entender bien la propuesta de manejo, seguimiento y diagnóstico nutricional en sistemas bajo fertirrigación, debemos plantearnos la siguiente cuestión:

«¿Qué disponibilidad de nutrientes interesa conocer en cada sistema?»

En los sistemas bajo fertirrigación interesa conocer la disponibilidad actual de cada nutriente. Estos sistemas ofrecen la posibilidad de reponer el agua y los nutrientes cada vez que se estime oportuno, por tanto el papel del suelo como despensa o almacén de nutrientes y agua para ir cediéndolos a la planta conforme esta los necesita, pasa a un segundo plano.

En los sistemas tradicionales o convencionales de secano o con riego no tecnificado, interesa conocer no solo la disponibilidad actual de los nutrientes, sino también la disponibilidad que tendrán a lo largo del ciclo de cultivo, o al menos entre un riego (o posibilidad de fertilización) y el siguiente.

Este enfoque permite extraer una serie de conclusiones al respecto, que definen todo el planteamiento nutricional en un tipo de sistema y otro:

- Bajo fertirriego se tiene la posibilidad de poner directamente a disposición de la raíz una solución balanceada de nutrientes que se adapte a la demanda del cultivo o a los intereses determinados del proyecto agrícola. La solución aportada interacciona con el suelo, estableciéndose un equilibrio dinámico entre los nutrientes de la solución del suelo y los retenidos por la matriz sólida del mismo (adsorbidos al complejo de cambio), pero finalmente termina equilibrándose el complejo de cambio si no lo estaba ya, y podemos disponer de una nutrición balanceada diaria si se desea, directamente preparada para su absorción por parte de la raíz.
- En sistemas convencionales o tradicionales resulta imprescindible que el suelo sea más o menos fértil. Se define la fertilidad de un suelo como la capacidad que tiene este para poner agua y nutrientes a disposición de la planta conforme esta los necesita.
Si un suelo tiene escasa fertilidad, difícilmente podrá ser exitoso en sistemas tradicionales de cultivo, porque no tendrá la capacidad suficiente de ceder agua y nutrir a la planta entre una aplicación y la siguiente.
Sin embargo, en fertirrigación no es estrictamente necesario que un suelo tenga una elevada fertilidad, basta con que sea capaz de mantener una adecuada oxigenación de la raíz. De esta forma un suelo arenoso, con un adecuado diseño de riego, es perfectamente cultivable bajo fertirriego, pero muy difícil de hacerlo bajo sistemas convencionales de cultivo.
- En fertirrigación, como lo que interesa es conocer la disponibilidad actual de los nutrientes, su seguimiento analítico debe estar basado en la determinación de los niveles de nutrientes solubles, presentes en la solución del suelo, que son los que verdaderamente están actualmente en disposición de ser absorbidos y asimilados por la planta. De

esta forma nos basamos en análisis de extracto saturado, de sonda de succión o de extracto 1:2, por ejemplo, para el seguimiento analítico de la disponibilidad de nutrientes en este tipo de sistemas.

- En sistemas convencionales, como interesa saber la disponibilidad actual de los nutrientes más la que existirá en un período de tiempo que abarque el ciclo de cultivo o el tiempo entre aplicaciones, su seguimiento analítico debe estar basado en extractantes que simulen el potencial de la raíz para ir extrayendo nutrientes del suelo, es decir, determinación de la disponibilidad de nutrientes en base a análisis de fertilidad del suelo, donde interesan los nutrientes actualmente disponibles más lo que pueden estarlo en un período más o menos prudente de tiempo (adsorbidos, ligados a la materia orgánica o formando complejos con ella, fijados en minerales arcillosos, precipitados en compuestos no altamente insolubles, etc.).
- Tanto en un tipo de sistema como en otro, además de la disponibilidad de nutrientes existen una serie de requisitos que han de permitir la captación de estos nutrientes disponibles, como estar libre de patógenos, mantener una adecuada temperatura, tener una adecuada estructura, mantener una aireación efectiva, tener un buen desarrollo de raíces, etc.

En este orden de cosas, bajo fertirrigación resulta básico el análisis del agua de riego como matriz para elaborar la solución nutritiva (SN) que aportamos al cultivo con el fin de tener un balance y concentraciones de nutrientes optimizados en la solución del suelo. En fertirriego hay que elaborar SN de concentración y equilibrios adaptados a los intereses del cultivo, con el objetivo de mantener un estricto control nutricional del cultivo en todo momento. No se fertiliza, no se riega, se fertirriega.

En condiciones ideales, si somos capaces de mantener en la solución del suelo el equilibrio y concentraciones de nutrientes coincidente con la demanda de la planta y nuestros propios intereses, cuando la planta transpire y suba por el torrente xilemático la cantidad exacta de nutrientes que se demanden, la planta podrá obtener estos sin un gasto energético extra ni por forzar la absorción de algunos ni por restringir la de otros en exceso. Esto permitirá a la planta dotar un aporte energético más eficiente a los procesos que nos interesan, es decir, producir más y de mejor calidad.

En contraposición, en un sistema convencional resulta básico el análisis del complejo de cambio como «almacén» encargado de ir cediendo nutrientes al cultivo entre una aplicación y la siguiente. En este tipo de sistemas hay que elaborar programas de fertilización en base a las extracciones que se sospecha va a tener el cultivo y reponerlas entre un ciclo de cultivo y el siguiente. De forma paralela se suministra la cantidad de agua que se estima oportuna siempre que ello sea factible. Se fertiliza y se riega de forma independiente.

Lógicamente, en sistemas de cultivo convencionales, el aprovechamiento de los nutrientes por parte del cultivo es muy inferior a sistemas bajo fertirrigación, con eficiencias de aprovechamiento estimadas 2-3 veces inferiores. Este grado de aprovechamiento aumenta conforme existe la posibilidad de fraccionar en más veces el aporte de nutrientes durante el cultivo, pero generalmente esto es limitado y tampoco supone una excesiva ventaja, ya que el grado de control que podemos hacer sobre el cultivo es bastante pobre y este es mucho más dependiente de factores agroclimáticos a los que no nos podemos adaptar nutricionalmente de forma efectiva en cada momento.

2.2.2. Factores influyentes y control del balance vegetativo/generativo. Relación N/K

Como se ha visto anteriormente, el éxito de un cultivo tecnificado radica en el hecho de una vez atendidas las prioridades del cultivo (clima, sanidad, labores culturales, riego), poder ejercer un control exhaustivo de la nutrición del mismo. El objetivo en el manejo del cultivo es mantener el balance vegetativo/generativo que interese en cada momento, y este es el fin que hemos de perseguir en su enfoque nutricional.

Una planta generativa es aquella en la que prevalecen los procesos reproductivos (floración, fructificación, maduración de frutos, etc.), la cual viene caracterizada por entrenudos cortos, crecimiento vegetativo detenido, hojas pequeñas, quebradizas y de color verde oscuro, estructuras lignificadas, aceleramiento de los procesos reproductivos (floración y maduración), flores pequeñas, raíz en proceso de destrucción, etc.

En cambio, una planta vegetativa se caracteriza por tener hojas grandes y suculentas de color verde claro, escasa carga de flores y/o frutos, flores grandes, entrenudos largos, flexibilidad en sus estructuras, brotes vigorosos, procesos reproductivos ralentizados (como floración o maduración), raíz desarrollándose, etc.

Figura 5. Planta de pimiento excesivamente generativa



Existen muchos factores que pueden hacer la planta más vegetativa o generativa de lo previsto, la Tabla 1 los resume.

Tabla 1. Factores influyentes en el balance vegetativo/generativo de una planta

Parámetro	Generativa	Vegetativa
Temperatura + HR	Alta + HR baja	Suave/alta + HR alta (fresca)
DPV	Alto	Bajo
Radiación	Intensa	Baja
Densidad	Baja	Alta
Vientos	Fuertes y secos	Nulos
Riego	Deficiente	Abundante
Salinidad	Elevada	Baja
Genética/Portainjerto	Poco vigorosa	Vigorizante
Edad de la planta	Adulta	Juvenil
Podas de hojas	Severas	Escasas o nulas
Aclareo de frutos	Escaso o nulo	Intenso
Relación N/K	Baja	Alta
Relación $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$	Alta	Baja

Una planta tiene tendencia generativa ante situaciones ambientales de estrés, como temperaturas elevadas, humedad relativa baja, radiación intensa, escasez de suministro hídrico, alta salinidad, en definitiva cualquier factor estresante (además de los mencionados, viento, plagas, enfermedades, manejos inadecuados, etc.). Está claro, que la planta, como ser vivo que es, cuando siente un estrés que puede poner en compromiso su vida, pone en marcha los mecanismos reproductivos como medio de supervivencia de su especie.

Una planta tiene tendencia a ser vegetativa ante situaciones ambientales de confort, con temperaturas frescas, humedad relativa media-alta, abundante suministro hídrico (sin causar falta de oxigenación en la raíz), intensidad de luz media-baja, baja salinidad, etc. La planta en este tipo de situaciones agroclimáticamente no agresivas, se ve con la capacidad de tener un mayor desarrollo, es decir, un mayor porte que le permita en un futuro mantener una cosecha abundante, e invierte su energía y fotosintatos en desarrollar estructuras celulares y crecer, es decir, ante condiciones favorables para un ciclo de vida longevo, la planta retrasa o ralentiza los procesos reproductivos induciendo un mayor desarrollo vegetativo que permita en su momento una producción más abundante.

Aunque la escasez de luz sea evidentemente un factor estresante, induce un comportamiento vegetativo de la planta, ya que en esas condiciones la planta emplea la práctica totalidad de la energía y fotosintatos que genera, en efectuar un crecimiento puramente vegetativo, elongando al máximo sus entrenudos aunque estos tengan bajo contenido de materia seca, con el fin de asomar por encima del dosel vegetal que le rodea y que la planta intuye que es el causante del sombreado recibido.

Teniendo en cuenta la incidencia de los factores mencionados, para el control del balance vegetativo/generativo, se abren diferentes posibilidades:

- Control climático propio de invernaderos (sombreados, ventilación, humidificación, calefacción, etc.).
- Manejo de la dosis y frecuencia de riegos y manejo de la CE en el entorno radicular (siempre teniendo en cuenta que un factor estresante puede hacer a una planta más generativa, pero a costa de reducir su capacidad productiva).

- Manejos culturales (elección de densidades de siembra, elección de portainjerto en su caso, podas, aclareo de frutos, etc.).

A nivel de fertilización, la herramienta nutricional que tenemos para manejar el balance vegetativo/generativo de un cultivo, es la relación N/K, y dentro del N total la proporción existente de N amoniacal. El correcto manejo de esta relación nos permitirá contrarrestar los factores (fundamentalmente ambientales) antes mencionados y adaptar el cultivo a nuestros intereses de acuerdo a la etapa fenológica en la que nos encontremos, sin que tengamos que inducir situaciones de estrés superfluas en la plantación.

La explicación de por qué la relación N/K es la responsable nutricional en el balance vegetativo/generativo, radica en lo siguiente: una planta en unas determinadas condiciones tiene un cierto rendimiento fotosintético, es decir, tiene una determinada capacidad de generar glucosa (azúcares, esqueletos carbonados). Estos azúcares sirven de sustrato en el proceso respiratorio para generar energía que es almacenada y transportada fundamentalmente en forma de ATP. Los azúcares que no son consumidos en la respiración, sirven de unidades estructurales (esqueletos carbonados) para los procesos de crecimiento y reserva de la planta.

El rol fisiológico del N en este aspecto, es utilizar esos azúcares (unidades estructurales) para fabricar aminoácidos y proteínas que constituyen la base de la formación de nuevas células, es decir, la base del crecimiento y desarrollo del vegetal.

El rol fisiológico del K en este aspecto es que estos azúcares se transporten y acumulen como reserva, es decir, acumulación de azúcares en frutos (elevación de °Brix), acumulación en forma de almidón, etc. Lógicamente si se promueve intensamente esta acumulación de azúcares como reserva, se ve detenido el crecimiento vegetativo de la planta, y se inducen los aspectos reproductivos, o sea, la planta tiende a un comportamiento generativo.

Adicionalmente también tiene gran influencia el porcentaje de N-amónico respecto a N-nítrico que defina el N total. El ión NH_4^+ es tóxico en forma libre para planta. De este modo todo ión NH_4^+ absorbido debe ser inmediatamente asimilado, combinado con azúcares procedentes de la fotosíntesis, para formar aminoácidos y proteínas, y por tanto, para inducir crecimiento vegetativo. Es decir, de forma casi independiente al K aportado, la cantidad

de N-amónico absorbido debe incorporarse al metabolismo induciendo el correspondiente efecto de desarrollo vegetativo en la planta.

2.2.3. Elección del balance vegetativo/generativo apropiado

Puede interesar una planta vegetativa (por ejemplo en las etapas iniciales), o generativa (etapas finales) o simplemente balanceada (cultivos en producción pero que deben seguir manteniendo un buen desarrollo vegetativo para atender un ciclo de cultivo más o menos largo).

Está claro que en función de la fase fenológica en la que se encuentre el cultivo puede interesar una planta más vegetativa o más generativa, por lo que es importante previamente definir con claridad qué etapas fenológicas distinguimos en nuestro cultivo para darle un manejo nutricional diferente.

Aunque después será la propia sintomatología de la plantación la que indique la conveniencia o no de modificar la solución nutritiva o la estrategia nutricional diseñada. En esas decisiones inciden aspectos climáticos, sanitarios, culturales o incluso de mercado (para adaptarse a criterios de calidad exigidos en el producto cosechado, o simplemente porque los precios aconsejen una ralentización o un aceleramiento de la producción).

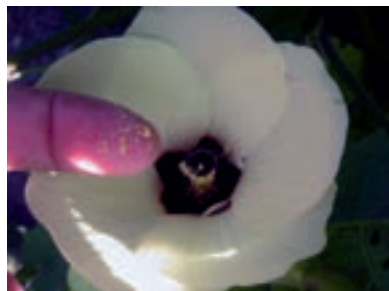
También es evidente que existen cultivos con necesidades más vegetativas que otros. Por ejemplo no es lo mismo un cultivo donde el producto recolectado sean flores (rosas), en comparación con otro que sean frutos inmaduros (pepino) o frutos maduros durante un ciclo de producción largo (tomate) o frutos maduros en recolección agrupada (sandía). En este caso, en el orden de mención de estos cultivos, deben tener una relación N/K decreciente en las etapas de recolección de cosecha.

Lo recomendado es definir las etapas fenológicas que exijan un diferente tratamiento nutricional en las que dividiremos al cultivo, y plantear para cada una de ellas la relación N/K a manejar teniendo en cuenta especie, variedad, portainjerto, ciclo de cultivo, clima esperado, calidad del agua, exigencias del mercado, etc.

Hemos de diferenciar aquí dos tipos de cultivos:

- Cultivos con etapas fisiológicas claramente definidas. Donde la fenología del cultivo no está solapada, p. ej. melón o sandía. En este tipo de cultivo generalmente se distinguen 4 fases que merecen un enfoque nutricional (relación N/K) diferente.

Figura 6. Hay que adaptar la solución nutritiva diseñada a cada etapa fenológica en la que se encuentre el cultivo



Por ejemplo un melón o una sandía, transcurriría por las etapas:

I. Desarrollo vegetativo (vegetativa).

- II. Floración-cuaje (generativa).
- III. Engorde del fruto (media-vegetativa).
- IV. Maduración-cosecha (generativa).

Figura 7. Fases fenológicas a distinguir en un cultivo de melón



Es importante reseñar que la definición del inicio o final de las diferentes etapas, debe estar referida a apreciaciones visibles y constatables en el cultivo, nunca a fechas de calendario o días después de siembra o trasplante, cuyo cumplimiento está muy supeditado a clima, variedades, portainjertos, manejos, etc.

Así, en el ejemplo anterior del melón, se puede proponer lo siguiente:

- I. Desde trasplante hasta cubrimiento total de la superficie y aparición de primeras flores femeninas.
- II. Hasta frutos con tamaño de una bola de tenis.
- III. Hasta llegar al 85 % del tamaño final del fruto.
- IV. Hasta finalización del cultivo.

Es claro, que estos momentos característicos pueden variar para cada producto, que cada especie o variedad tendrá los suyos o que en función en este caso del tipo de melón, variedad, condiciones agroclimáticas, etc., puede ser posible eliminar alguna de estas etapas o desdoblar alguna de ellas (como la de maduración-cosecha).

Lo que resulta decisivo es definir una estrategia nutricional previa basada en este enfoque, aunque posteriormente, la propia sintomatología de la plantación indicará si es oportuno o no llevar a cabo reajustes de la misma.

En el caso del ejemplo del melón se definirían 3 soluciones nutritivas (SN) (vegetativa, media y generativa), la vegetativa se emplearía en la I, la media en la III y la generativa tanto en la II como en la IV, aunque son etapas bien diferenciadas, los efectos que se desean provocar en la planta son idénticos, detención del crecimiento vegetativo, inducción de los procesos reproductivos y acumulación de azúcares en reserva.

Lógicamente, todos estos cambios nutricionales deben estar en concordancia con otros aspectos del manejo del cultivo, por ejemplo en el melón el cambio a SN generativa para inducir una abundante floración y un cuajado efectivo, no tendría sentido si no está asegurado el correcto funcionamiento de las colmenas de abejas en ese momento.

- Cultivos con etapas fisiológicas solapadas. Donde se alcanza un momento en que la fisiología de la planta está completamente traslapada, y coexisten frutos en maduración, frutos en desarrollo, frutos cuajando, flores, desarrollo vegetativo, p. ej. tomate, pimiento, pepino, berenjena, y mucho más si se trata de cultivos de ciclo largo en invernadero. En este tipo de cultivo generalmente se distinguen 2-3 fases que merecen un enfoque nutricional (relación N/K) diferente.

Por ejemplo un tomate de invernadero, transcurriría por las etapas:

- I. Desarrollo vegetativo (vegetativa, hasta inicio de cambio de color del primer fruto).
- II. Balanceada (media, hasta finalización del cultivo).

Figura 8. Fases fenológicas a distinguir en un cultivo de tomate en invernadero



Es posible diferenciar una etapa III generativa coincidiendo con el capado de la planta para forzar la salida acelerada de la fruta, porque ya no interesa más crecimiento vegetativo. Pero en la práctica, en ese momento las plantas ya están en edad avanzada, lo que induce un componente generativo que es más que suficiente, incluso en ocasiones hay que contrarrestarlo aplicando un SN más vegetativa de lo previsto.

2.2.4. Establecimiento de la relación N/K. Valores de referencia

Los diferentes componentes de la SN los expresaremos en mmol L^{-1} . Por dar unos valores de referencia para cultivos de alto potencial productivo (cultivos sin suelo o hidropónicos), expresados en mmol L^{-1} , se puede considerar una relación N/K típicamente vegetativa 14/5 o 15/5, una media 12/6 o 12/7 y una típicamente generativa 11/9 o 11/8. Está claro que se pueden utilizar relaciones intermedias y también otras mucho más acusadas que las mencionadas, y que siempre hablamos de relaciones (la misma relación sería 14/5 que 7/2,5).

Los valores concretos (mmol L^{-1}) de nitrógeno y potasio a utilizar dependen del potencial productivo del cultivo (no es lo mismo un cultivo al aire libre que otro en un invernadero de ambiente totalmente controlado y en

hidroponía), del clima prevaleciente (invierno – verano) o incluso del presupuesto que se estime oportuno gastar en fertilizantes, y que viene directamente relacionado con la rentabilidad estimada del producto a cosechar.

En hidroponía se utilizan concentraciones altas, del orden de los valores de referencia dados con anterioridad. En este tipo de sistemas el potencial productivo del sistema está maximizado y cada gota aportada al cultivo debe ir con una SN completa de nutrientes convenientemente balanceada.

En cultivo en suelo se pueden utilizar este orden de concentraciones sin ningún perjuicio para el cultivo, pero al ser lógicamente inferior el potencial del cultivo y superior el aporte hídrico por producto cosechado, respecto a sistemas hidropónicos, supondría en la mayoría de casos un suministro de fertilizantes superior al demandado por el cultivo y por tanto un encarecimiento del proyecto.

Para adaptarnos a esta situación tenemos dos posibilidades:

- Aplicar siempre una SN completa, que mantenga los mismos ratios N/K pero con concentraciones menores, por ejemplo un equivalente a una SN 12/6, podría ser una SN 8/4 o una 6/3. Después mediante los oportunos seguimientos analíticos del cultivo podremos saber si nos encontramos en el orden de demanda del cultivo o si por el contrario tenemos que reajustarlos.

Este tipo de funcionamientos es perfectamente aplicable a cultivos hortícolas en suelo dentro de invernaderos o a cultivos a campo abierto de ciclo corto o bien con demandas hídricas bajas.

Lo normal es manejar concentraciones N/K del orden del 40-100% de la utilizadas en hidroponía, dependiendo del potencial de cada cultivo y de sus condiciones agroclimáticas.

- Emplear un tiempo de pre-riego con agua sola para ajustar el aporte de SN. Aunque lo deseable es aplicar siempre una SN completa durante todo el transcurso de un riego, en cultivos donde se precisa dar riegos de duración más o menos larga (de una hora o más) y más si no se cuenta con equipos automáticos para la inyección de fertilizantes, esto puede no ser operativo.

Efectivamente, si en un riego de una hora de duración, se aplica una SN 12/6, dando 25 minutos de pre-riego (con agua sola), 30 minutos de fertilización con una SN 12/6 y 5 minutos de posriego para

el lavado de mangueras, es equivalente a aplicar una SN 6/3, durante todo el periodo de riego.

El seguimiento analítico de la solución del suelo, como después veremos, servirá para estimar si estamos ajustándonos o no a la demanda nutricional del cultivo.

Cuando se trabaja así, el fertilizante se aplicará siempre en la segunda mitad del riego, es decir, será el período de pre-riego el que se alargue el tiempo considerado, pero el tiempo de posriego, permanecerá siempre invariable y será de corta duración y coincidente con el tiempo necesario en cada sector para vaciar las mangueras de fertilizante.

En general, fisiológicamente interesan valores de concentraciones elevados en los equilibrios, económicamente puede no ser así si el potencial del cultivo no es máximo, con lo que se pueden ajustar las relaciones a valores más bajos para ahorrar en gasto fertilizante. Claro está, que conforme se bajen estas concentraciones en los equilibrios, podemos limitar la productividad del cultivo, y la solución en el entorno radicular sufrirá desajustes con mayor facilidad.

Además, la especie, la variedad, el empleo o no de portainjerto, las exigencias del mercado, etc., influyen sobremedida en estos valores. Por ejemplo, y como después iremos viendo, una SN media para pimiento puede ser vegetativa para tomate. O dependiendo de las circunstancias agroclimáticas, de edad de la planta y varietales, incluso tener que ser utilizada una SN típicamente vegetativa durante un período considerado generativo, finalmente el objetivo es poder ejercer el control del balance vegetativo/generativo, y el reajuste de la relación N/K es probablemente la mejor herramienta a nuestro alcance para conseguirlo.

2.2.5. Relaciones N/K según cultivos

Comparemos diferentes cultivos en su momento de recolección: rosa, lechuga, pepino, tomate y melón. Durante la cosecha, en el caso de la rosa estamos recolectando flores, en la lechuga hojas, en el pepino frutos inmaduros, en el tomate frutos maduros pero hemos de seguir respetando un crecimiento vegetativo adecuado porque la cosecha se prolonga durante un largo período y en el melón frutos maduros, y normalmente coincidiendo poco después con la finalización del ciclo de cultivo.

Resulta evidente que a pesar de estar en el momento de la recolección no se pueden manejar todos esos cultivos con la misma relación N/K. En general, la relación N/K será decreciente en el orden en que se han mencionado esos cultivos.

Además hay que tener en cuenta particularidades de cada caso, por ejemplo, si la lechuga es acogollada hay que emplear relaciones N/K algo menores para favorecer el acogollado, no es lo mismo un tomate tipo *Cherry* que uno de gran calibre, no es el mismo enfoque si se persigue un rebrote en la plantación de melón con el fin de prolongar la cosecha que si no se contempla este hecho.

Fijémonos en otro cultivo, el pimiento. En comparación con tomate ambos suelen ser cultivos de ciclo más o menos largo donde se aprovechan sus frutos, pero el pimiento se suele manejar con relaciones N/K más altas que el tomate. El hecho obedece a que el pimiento es una hortícola semiarbustiva, que tiende a lignificarse, lo cual va en perjuicio de un cultivo de ciclo prolongado. Manteniendo una relación N/K más alta favorecemos el comportamiento herbáceo de la planta, mucho más adaptado al manejo que se le da al cultivo comercial. Además tampoco es lo mismo recolectar pimientos en verde, que hacerlo un vez que ya han virado de color.

Típicamente y sabiendo, que son muchos los factores influyentes, algunas relaciones N/K que se pueden proponer para cultivos ya en cosecha pueden ser los siguientes: rosa hidroponía (14/4,5), clavel hidroponía (13/7), gerbera hidroponía (11,5/6), fresa hidroponía (12/6,5), melón suelo campo abierto (4/6), pepino hidroponía (14/7), pimiento hidroponía (13/5,5), tomate hidroponía (11/7). Los cultivos referenciados como hidropónicos pueden mantener ese mismo ratio en suelo, simplemente adaptando las concentraciones al potencial productivo del cultivo en comparación con uno hidropónico. Además en los cultivo en suelo se maneja el concepto de prerriego, como antes se comentó.

2.2.6. Establecimiento del resto de componentes de la solución nutritiva. Balances nutricionales

Una vez se tengan definidos los valores (mmol L^{-1}) de N y K, el resto de iones mayoritarios que forman la solución nutritiva se balancean atendiendo la composición del agua de riego.

La relación Ca/Mg debe guardar unos ratios más o menos definidos (en torno a 2).

Como norma práctica podemos establecer un rango de Ca óptimo en suelo de 3-6 mmol L⁻¹, y en hidroponía de 4-6 mmol L⁻¹. Aportar más de 6 mmol L⁻¹ de Ca, en la mayoría de casos no soluciona nada. En general debemos contemplar los mínimos de Ca en cada caso y si el agua de riego tiene mucho Na elevarlos hasta el nivel superior del rango. Mg debemos intentar que se mantenga en la mitad que el Ca en todo momento.

K debería estar cercano al nivel de Ca, aunque no debemos ser tan restrictivos como lo referido para Mg. Como la relación N/K es la partida para completar el diseño de la SN, una vez definida, intentaremos mantener Ca alto cuando el K también lo esté y a la inversa. Todo ello considerando aspectos económicos, difícilmente será rentable mantener 6 mmol L⁻¹ de Ca si manejamos un agua de riego sin nada de Ca.

P debe mantener un ratio adecuado sobre el total de aniones de la solución nutritiva (5-8 % del total en mmol L⁻¹). Generalmente se aplican en hidroponía 1-1,5 mmol L⁻¹ y se mantienen más o menos durante todo el ciclo. En suelo el rango puede ser más variable, pero en general estaría en 0,3-1 mmol L⁻¹.

El S (SO₄⁻²) se debe mantener en un mínimo del 10-15 % del N aplicado, pero a menudo, es el elemento que se utiliza como «comodín» para el ajuste de las SN, ya que su exceso no ocasiona normalmente graves inconvenientes.

Los micronutrientes pueden mantenerse a unos niveles aproximadamente constantes a lo largo del ciclo de cultivo. En hidroponía se suele aportar 0,015-0,025 g/l de un mix que tenga una composición del tipo:

7,5 % Fe; 3,5 % Mn; 1,7 % Zn; 0,4 % Cu; 1,7 % B y 0,2 % Mo

Lo que se persigue es tener aproximadamente en la SN final en ppm Fe 2; Mn 1; Zn 0,4-0,5; B 0,4-0,5; Cu 0,1-0,2; Mo 0,05. Y este aporte se mantiene durante todo el ciclo de cultivo.

Para cultivos en suelo, hay que evaluar los niveles de micronutrientes asimilables que hay disponibles, y en función de eso aportar de forma individual aquel que interese en su debida proporción, o confeccionar un mix adaptado a las exigencias de cada suelo. Generalmente son cantidades inferiores a la tercera parte de lo mencionado para hidroponía.

De esta forma, a modo de ejemplo, veamos como planteamos el balance de una SN de relación N/K 12/6 (12 mmol L⁻¹ de N, fundamentalmente en forma NO₃⁻, y 6 de K⁺) para un cultivo sin suelo de pepino.

- Dependiendo de la cantidad de Ca que ya lleve el agua de riego y de su contenido relativo de Na (y Mg en su caso), podíamos proponer 4 o 5 mmol L⁻¹ de Ca⁺².
- De Mg debemos sugerir la mitad del Ca (2-2,5 mmol L⁻¹ de Mg⁺²).
- De P, podíamos proponer 1,2-1,5 mmol L⁻¹ de H₂PO₄⁻.
- De SO₄⁻² necesitamos un mínimo de 1-1,2 mmol L⁻¹, aunque no ocurriría nada si los niveles son mayores.
- Por último debemos mantener un aporte equilibrado de micronutrientes (2 ppm Fe, 1 ppm Mn, 0,5 ppm Zn, 0,4 ppm B, 0,2 ppm Cu, 0,05 ppm Mo) y un pH ajustado a 5,5.
- También pueden incorporarse otros elementos no estrictamente esenciales como Si, que en concentraciones en torno a 1 mmol L⁻¹, pueden mejorar rendimientos y ser beneficioso ante enfermedades fúngicas como el mildiu en pepino.

2.2.7. Estrategia de uso y cambios de la solución nutritiva

De acuerdo a lo visto en los puntos inmediatamente anteriores, para cada etapa fenológica definida, se diseña una determinada SN, que básicamente se caracteriza por tener diferente relación N/K y donde se contempla un correcto balance entre los nutrientes aportados, de forma que los antagonismos entre ellos sean mínimos.

El correcto balance nutricional, una vez establecida la relación N/K, fundamentalmente depende de la composición del agua de riego. Por esta razón, y dado que en general cada proyecto agrícola en un momento dado funciona con una única fuente de agua de riego, resulta enormemente práctico establecer la siguiente estrategia de aplicación de SN:

- En función del cultivo o cultivos a tratar, definimos de 2 a 5 SN, con diferentes relaciones N/K, y adecuadamente equilibradas de acuerdo a la composición del agua de riego.

- Ordenamos estas SN en orden decreciente de relación N/K, es decir, de más vegetativa a más generativa, y las nombramos como SN I (supervegetativa), SN II (vegetativa), SN III (media), SN IV (generativa), SN V (supergenerativa)...
- Asignamos a cada etapa fenológica su SN correspondiente, así en el ejemplo del melón relatado con anterioridad, tendríamos:
 - Etapa 1. Desarrollo vegetativo. Desde trasplante hasta cubrimiento total de la superficie y aparición de primeras flores femeninas. SN II.
 - Etapa 2. Floración-cuaje. Hasta frutos con tamaño de una bola de tenis. SN IV.
 - Etapa 3. Engorde de fruta. Hasta llegar al 85 % del tamaño final del fruto. SN III.
 - Etapa 4. Maduración-cosecha. Hasta finalización del cultivo. SN IV.

Esto, cuando se tienen diferentes sectores en un mismo proyecto, por ejemplo, diferentes variedades (o tipos de melón en este caso), fechas de plantación, exigencias de mercado (fruta para el mercado norteamericano y europeo, siendo más exigente en calibre el mercado norteamericano y más en otros caracteres de calidad el europeo), diferentes especies (por ejemplo en cultivos de flores es normal tener multitud de especies distintas cultivadas en un mismo proyecto), etc., puede dar lugar a códigos que definen la secuencia de aplicaciones de SN prevista. En el caso del ejemplo, el código sería 2.434, coincidiendo con el orden y número de la SN aplicada.

- Queda claro que en función de las condiciones varietales, portainjertos, clima, análisis efectuados y, sobre todo, sintomatología y estado de la planta se podrá saltar durante un determinado número de días a la SN inmediatamente superior o inferior sobre lo previsto, con el fin de mantener la planta con el balance vegetativo-generativo deseado.

Resulta mucho más práctico definir este número limitado de SN adaptadas a un proyecto concreto, y cambiar de una a otra cuando el programa previsto o los caracteres de planta y fruta así lo sugieran. Siempre teniendo en cuenta, por supuesto, otras informaciones tales como clima actual y espera-

do, análisis efectuados, exigencias de mercado, juvenilidad o envejecimiento de la planta, etc.

Esto simplifica mucho más la operatividad en los cabezales de riego, que no estar ajustando de forma permanente nutriente a nutriente, y los resultados son más compensados para el cultivo.

Está claro que nuestro objetivo técnico desde el punto de vista nutricional es mantener el adecuado balance vegetativo/generativo de la planta, y maximizar la productividad y calidad de los productos agrícolas cosechados, de forma que nunca la nutrición sea el limitante de esto.

Adicionalmente, siempre garantizando los objetivos anteriores, debemos intentar que el programa de fertirriego sea lo más económico posible. La forma de saber si las propuestas de SN planteadas coinciden con la demanda de la planta y se justifica su coste, o por el contrario, están sobredimensionadas o por debajo de la misma, además de apreciación del cultivo, es establecer un correcto programa de seguimiento en base a análisis de la solución del suelo entre otros, que nos permitan reajustar las SN planteadas o modificar tiempos de prerriego.

Figura 9. Tanques de diferentes soluciones nutritivas a pie de campo para aplicar según etapa fenológica y sintomatología de la plantación



2.3. Consideraciones y diagnóstico nutricional de la SN

2.3.1. Consideraciones generales

Un correcto diagnóstico de los cultivos bajo fertirriego debe involucrar los parámetros de la solución nutritiva aplicada, los del medio externo al sue-

lo/sustrato (condiciones climáticas, estado fenológico del cultivo, manejo del mismo, análisis de material vegetal, etc.) y los parámetros correspondientes a la solución del suelo/sustrato o del medio radicular, evaluados como análisis de drenaje (lisímetros o bandejas de drenaje en cultivos sin suelo) o de la solución extraída mediante jeringa o sonda de succión del suelo/sustrato o determinada por mezcla a determinada proporción de suelo/sustrato y agua (análisis de pasta saturada, análisis de extracto 1:2).

Figura 10. Sonda de succión, equipo complementario de extracción y extractómetro capilar para extraer la solución del suelo



2.3.2. pH

El pH de la solución nutritiva se ajusta al valor que permita obtener en el medio radicular los valores óptimos deseados (6-6,5 de forma general). Indicar que valores inferiores de pH son interesantes en cultivos o variedades susceptibles a clorosis como rosa, gerbera o arándanos.

Otra cuestión respecto al pH de la solución nutritiva es la influencia del balance de absorción cationes/aniones. Cuando un cultivo absorbe mayoritariamente aniones (nitratos principalmente), para el mantenimiento de la neutralidad eléctrica, la raíz libera al medio iones OH^- , lo que incrementa los valores de pH. Esta es una de las razones por las que suele ser normal que en cultivos fundamentalmente en sustrato, la solución drenada o en raíz presente valores de pH superiores a la solución nutritiva en 0,5-1,5 unidades. Otra razón es la formación de bicarbonato por disolución del CO_2 .

Pero en determinados momentos puede ser mayoritaria la absorción de cationes (fuertes absorciones de potasio suelen ser las responsables, por ejemplo en cultivo de melón al inicio de la maduración), con lo que la raíz libera H^+ , para conservar el balance eléctrico. Entonces el pH de la solución del entorno de la raíz desciende respecto a la SN aportada. Cuando esto sucede se ha de suprimir todo aporte de ión NH_4^+ , para que la planta absorba la totalidad del nitrógeno en forma nítrica, y también debe reducirse o suprimirse la adición de ácidos en la SN. De esta forma el ratio NH_4^+/NO_3^- , juega un papel primordial en el ajuste del pH en el entorno radical, ya que es un nutriente demandado en gran cantidad y que puede asimilarse en forma de anión y/o catión. En condiciones normales no es aconsejable que el aporte de nitrógeno amoniacal (o ureico) sea superior al 10 % del total en cultivos sin suelo o al 25-30 % en cultivos en suelo.

En cualquier caso deben evitarse valores de pH en la rizosfera inferiores a 5 (a pH 4 se dañarían las raíces de la mayoría de cultivos) y superiores a 6,5-6,8, con los que bajaría drásticamente la disponibilidad de fósforo y algunos microelementos.

A este respecto indicar la gran dependencia del pH en la absorción de micronutrientes. Fe, Mn, Zn y Cu ven estimulada su absorción por un bajo pH, la asimilación del B no es afectada apreciablemente a los valores usuales de pH, mientras que el Mo ve dificultada su absorción conforme decrecen los valores de pH.

Otra observación es que los valores de pH justo debajo del emisor, son más bajos que los encontrados entre dos emisores.

2.3.3. Dinámica de absorción de los diferentes nutrientes

En el entorno de la raíz se encuentran unas concentraciones de iones divalentes relativamente elevadas, ya que su absorción es más dificultosa que la de los iones monovalentes. De esta forma existen una serie de nutrientes que, por su dinámica de absorción, precisan concentraciones en la solución del suelo/sustrato o de drenaje claramente superiores que en la SN aportada (del 20 al 50 % más concentrados, o incluso más), para encontrarse en correcto equilibrio. Tal es el caso de calcio, magnesio, sulfatos y también boro.

Por el contrario amonio, fosfatos, nitratos, potasio y manganeso, de absorción rápida y facilitada por parte de la raíz, interesa encontrarlos en concentraciones inferiores en la solución de suelo/sustrato respecto a la solución de entrada. Bien es cierto que la dinámica a seguir por nitratos y potasio, dependen mucho de la relación N/K pretendida en función del estado fenológico del cultivo, su sintomatología, la radiación predominante y el nivel de cloruros y sodio en el agua de riego.

2.3.4. Interacciones entre elementos

Uno de los aspectos más destacados a la hora de abordar la dinámica de los diferentes nutrientes son las interacciones iónicas, que ocurren cuando el suministro de un nutriente afecta la absorción, distribución o funciones de algún otro.

Son los conocidos antagonismos y sinergismos entre los diferentes elementos. Debe resaltarse que es posible encontrar citas bibliográficas que recogen innumerables interacciones entre elementos, a menudo contradictorias, en función de la especie considerada y las particularidades de la investigación efectuada. En muchas ocasiones dos elementos pueden comportarse como sinérgicos o antagonicos en función de sus proporciones relativas, de esta forma si guardan un correcto equilibrio se muestran como sinérgicos, pero si uno de ellos se encuentra en una proporción excesiva puede reducir o bloquear la absorción del otro.

En definitiva, el manejo de un correcto balance entre nutrientes es frecuentemente mucho más importante que las cantidades relativas de cada uno de ellos.

Téngase en cuenta que si somos capaces de mantener una solución nutritiva en contacto con las raíces con un equilibrio y concentraciones de nutrientes coincidentes con la demanda de la planta, esta en el proceso pasivo de transpiración podría asimilarlos con poco gasto energético al no tener que forzar absorciones o rechazos en contra de los equilibrios químicos naturales, muy demandantes de energía y que restan potencial productivo al cultivo.

2.3.5. Temperatura

En general, los aniones se absorben y transportan peor a bajas temperaturas, sobre todo el fósforo, y también ocurre esto con el magnesio. Por esta

razón, con presencia de temperaturas bajas conviene reforzar el suministro de fosfatos, sulfatos, nitratos y magnesio, además de la utilización de SN más concentradas en general, durante épocas frías con baja transpiración. Por el contrario, la deficiencia de cinc es más frecuente durante la época estival.

Ni que decir tiene, que una temperatura adecuada en la rizosfera (18-25 °C) estimula el desarrollo de las raíces y giberelinas en la raíz y la biomasa generada.

Figura 11. Temperaturas a nivel de raíz por muy calientes o muy frías influyen de manera determinante sobre la actividad radicular y en consecuencia sobre la asimilación de nutrientes



2.3.6. Movilidad de los elementos en la planta

Conviene recordar que los elementos móviles en el interior de la planta (nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio) manifestarán sus síntomas de deficiencia inicialmente en las hojas adultas o basales. Por el contrario, aquellos elementos que se movilen con dificultad en el interior de la planta (azufre, calcio, hierro, manganeso, cinc, boro), mostrarán sus síntomas de carencia inicialmente en las partes jóvenes de la planta.

2.4. Seguimiento y control nutricional

2.4.1. Información complementaria

Antes de entrar en el planteamiento del seguimiento y control de parámetros puramente nutricionales, conviene recordar, que el éxito de la nutrición viene condicionada por una serie de aspectos a los que también resulta estrictamente necesario dar seguimiento. Por recordar algunos:

- *Clima*: temperaturas, humedad relativa, déficit de presión de vapor, radiación, nivel de CO₂ en su caso, etc.
- *Estructura del suelo*: medidas de densidad aparente, visualización de desarrollo y estado sanitario de la raíz.
- *Parámetros físico-químicos del suelo*: textura, pH, CE, nivel de materia orgánica.
- *Riego*: estudio y revisión de su diseño, estimación de dosis de riego, instalación y seguimiento de tensiómetros, lisímetros, etc.

Además del interés en recabar toda la información posible respecto a especie, variedad, condiciones de mercado, plagas y enfermedades habituales, historial productivo, etc.

Parece lógico, aunque raramente se hace, que al igual que en cultivos hidropónicos se lleva un control de los parámetros climáticos dentro del invernadero y una planilla diaria donde se recogen los valores concernientes a pH, CE y riego (volumen aplicado, drenaje), esto convenientemente adaptado, también se haga en cultivos en suelo.

Al menos interesaría un seguimiento del clima (temperatura, humedad relativa, dpv y radiación) y una planilla del seguimiento de valores de pH, CE y parámetros de riego, tal y como muestra la Tabla 2.

Tabla 2. Planillas de seguimiento de parámetros de riego, CE y pH en sistemas bajo fertirrigación

Planilla completa: pH, CE, lisímetro y tensiómetros

Lote:

Variedad: Fecha de plantación:

Fecha	Solución nutritiva (1)		Rizosfera (2)		Riegos (3)			Lisímetro (4)			Tensiómetros (5)		Observaciones (6)
	pH	CE	Volumen	pH	CE	Duración total	Fertilizado	pH	CE	Volumen	Antes de riego	2-3 horas después de riego	

- (1): pH y CE de solución nutritiva tomadas directamente de un gotero donde se recoge el volumen de un riego completo y anotarlo.
- (2): pH y CE en rizosfera medidos mediante lectura directa en suelo en la zona de máxima actividad de raíces.
- (3): Anotar duración total del riego y fracción fertilizada de ese tiempo y número de riegos.
- (4): pH, CE y volumen recogido en el lisímetro y % drenado respecto a la solución nutritiva aportada teniendo en cuenta el número de goteros que tiene el lisímetro.
- (5): Anotar lectura de tensiómetro dispuesto en zona crítica de mantenimiento de humedad, justo antes del riego y 2 o 3 horas después de su finalización.
- (6): Anotar observaciones sobre la plantación o clima predominante o anomalías en la ejecución del riego y otros.

Planilla simple: pH, CE y tensiómetros

Lote:

Variedad: Fecha de plantación:

Fecha	Solución nutritiva		Rizosfera		Riegos			Tensiómetros		Observaciones
	pH	CE	pH	CE	Núm.	Duración total	Fertilizado	Antes de riego	2-3 horas después de riego	

Figura 12. Captación de muestras de solución nutritiva (gotero) y drenaje (lisímetro) en cultivo de tomate



2.4.2. Seguimiento y control nutricional en fertirriego

Independientemente de otros reportes analíticos como análisis de fertilidad, análisis foliares o de savia, el seguimiento y la nutrición en fertirriego para la toma de decisiones, junto a la sintomatología del cultivo y la información complementaria anterior, debe estar basado en el análisis de la solución del suelo en la zona de máxima actividad radicular.

Para ello se pueden emplear análisis de sondas de succión convenientemente instaladas. Un análisis de extracto saturado es igualmente válido y equivalente a la información aportada por las sondas de succión, si bien los valores analíticos pueden diferir ligeramente.

También sería igualmente válido el seguimiento de la solución del suelo mediante análisis de extractos diluidos a proporción fija suelo: agua (el 1:2 es el más generalizado en este sentido, una parte de suelo en un volumen total de 2), en los que la preparación de la muestra es más rápida y mucho menos engorrosa, y respecto al seguimiento de las sondas de succión tiene la ventaja de no depender tanto del estado de humedad del suelo. Bien es cierto que las sondas de succión ofrecen un sistema más adaptado para el seguimiento de la evolución de un cultivo, ya que esta se centra en un mismo punto y no depende tanto del punto de muestreo al ser este prefijado.

Los valores obtenidos en un análisis de extracto diluido 1:2, aunque influye el tipo de suelo, son equivalentes a dividir los de sonda de succión o extracto saturado por un factor 2-3 (excepto, lógicamente pH y bicarbonatos).

El seguimiento de los valores obtenidos en el análisis de la solución del suelo no puede establecerse simplemente mediante empleo de tablas de referencia. El diagnóstico debe realizarse mediante el seguimiento de la evolución de los valores y la respuesta de la planta, es decir, además del valor absoluto de los parámetros medidos interesa conocer su evolución a lo largo del tiempo de desarrollo del cultivo, y relacionar esto con la respuesta o sintomatología del cultivo y con otra información complementaria.

Así por ejemplo, si evaluamos cuales son los niveles permisibles de sodio (o cloruros) en la solución del suelo:

- No es lo mismo que se trate de una especie o variedad sensible que otra tolerante.
- No es lo mismo partir de un agua con muy poca cantidad de sodio (cloruros) que de otra con 4-5 mmol L⁻¹, en esta última debemos poner más atención, quizá limite el correcto desarrollo de ciertas especies, quizá nos obligue a determinada gestión y tipo de riego y al uso de suelos más permeables, pero en todo caso debemos ser más permisibles con los niveles encontrados en el análisis.
- Además los factores climáticos determinan el índice de transpiración de la planta y por tanto la velocidad de concentración del sodio (cloruro) en el entorno radicular, al tratarse de un elemento que la planta pretende limitar su absorción, evidentemente la velocidad de concentración es mayor en verano que en invierno.
- De acuerdo con esto hay que manejar el riego para evitar esa reconcentración y no es lo mismo en la eficiencia del lavado de sodio (cloruros) si se maneja un riego convenientemente diseñado y con camas elevadas que si carecemos de ello.
- Y tampoco es lo mismo disponer de un suelo con elevada retención hídrica y escasa capacidad de aireación, que a la inversa. Incluso según la especie o la calidad de agua de riego debemos potenciar un suelo con drenaje interno mucho más favorecido.
- Tampoco es lo mismo, suponiendo que no se empleen fertilizantes que pudieran subir el nivel de sodio (cloruros) en la solución del sue-

lo, trabajar con soluciones nutritivas balanceadas y de concentración más o menos fuerte, que con otras mucho más livianas, en el primer caso los ratios de los diferentes elementos respecto al sodio (cloruros) son mucho más favorables (aunque el nivel absoluto de la concentración de sodio o cloruros sea el mismo), y se pueden mantener niveles de interpretación del sodio (cloruros) más elevados.

- Y evidentemente hay que considerar de cara a emitir un diagnóstico, la demanda del mercado en cuanto a calibres, °Brix, succulencia de hojas, vida de anaquel exigida, etc.

Antes de fijar qué niveles de parámetros vamos a perseguir en la solución del suelo, conviene a modo de recordatorio, efectuar una revisión rápida de lo que implica el análisis de agua de riego, como matriz en la elaboración de SN.

Parámetros físico-químicos

CE

El valor ideal depende de la especie considerada. En principio valores menores a 1 dS m^{-1} no deben dar problemas en ningún caso. Los valores de $1\text{-}2 \text{ dS m}^{-1}$ podrían utilizarse en la mayoría de casos, aunque todo depende del equilibrio de iones que genere esa CE. Los de $2\text{-}3 \text{ dS m}^{-1}$, dependiendo de la composición, tienen un uso limitado a determinadas especies con goteo y suelos con buen drenaje, y aquellos mayores de 3 dS m^{-1} tienen uso solo en casos de especies tolerantes con drenaje intensamente favorecido y con composición de iones favorable.

pH

Valores normales: 7-8,2. Valores ideales: 5,5-6,5.

Lo normal para tener un pH óptimo en la SN es acidificar para neutralizar bicarbonatos, y ajustar el pH evitando así obstrucciones en red de riego y procurando un entorno más favorable en la solución del suelo en cuanto a disponibilidad de elementos. De ahí que el valor de pH, más concretamente la capacidad del agua para variar su pH, esté íntimamente ligada al nivel de HCO_3^- presente, siendo adecuado neutralizar aproximadamente el 75 % de los HCO_3^- existentes para tener un pH en torno a 6 a la salida del emisor.

Iones de aporte nutricional



Valores óptimos: 3-5 mmol L⁻¹.



Valores óptimos: 1,5-2,5 mmol L⁻¹.

Ca/Mg debe ser 2, para ello se elabora la solución nutritiva buscando este ratio.



Valores óptimos: 1-2 mmol L⁻¹.

El sulfato no genera una toxicidad directa, por lo que si se rebasan esos niveles nunca es alarmante hasta valores superiores a 10 o más.



Valores normales: < 0,5 mmol L⁻¹.



Valores normales: < 0,5 mmol L⁻¹.

Son iones que salvo casos excepcionales siempre hay que aportar en forma de fertilizante, aunque con presencia considerable en el agua de riego conviene tenerlo en cuenta para reducir esta contribución del aporte fertilizante.

Elementos fitotóxicos



Valores óptimos: < 4 mmol L⁻¹.

Cl⁻

Valores óptimos: < 4 mmol L⁻¹.

B

Valores óptimos: 0,2-0,5 ppm.

Realmente estos elementos son los limitantes del empleo del agua de riego en la mayoría de casos, ya que sí pueden generar una toxicidad específica en el cultivo. Con los valores reseñados y un buen control en la gestión del riego y drenaje no debe haber problemas en la mayoría de cultivos, salvo plantas sensibles. El B también es un elemento a aportar, pero su presencia en el agua entre los valores indicados no haría necesario su aporte, ahora bien, según la especie valores superiores a 0,5 ppm pueden empezar a causar problemas de toxicidad, estando todo ello ligado al manejo del riego y drenaje.

Otros micronutrientes

Fe, Mn, Zn, Cu

En la mayor parte de los casos (sobre todo Fe y Mn en menor medida) su presencia en el agua de riego es indeseable, ya que tienden a oxidarse, no estar disponibles para la planta y además poder contribuir a las obstrucciones de la red de riego.

2.4.3. Análisis de sondas de succión, extracto saturado y/o extracto 1:2

Evaluemos ahora los valores esperados en la solución del suelo. Tomemos como referencia el análisis del extracto de sondas de succión, más o menos equivalente al extracto en pasta saturada y/o el del extracto 1:2. Se escoge el análisis de extracto 1:2 en volumen, por su sencillez (respecto al análisis de extracto saturado) y su grado de dilución bajo pero suficiente para independizarlo de los contenidos de humedad que tenga la muestra.

Para efectuar un estimación de lo que tendría el análisis de extracto saturado a partir del análisis de extracto 1:2 habría que multiplicar cada parámetro por un factor en torno a 2-3 (excepto el pH claro está, que prácticamente se mantiene, aunque se eleva un poco más en los extractos más diluidos, y el nivel de bicarbonatos que está íntimamente ligado al valor de pH).

Si se efectúa una buena gestión del riego, lo normal es que los valores de la solución nutritiva (excepto pH y HCO_3^- que están ligados a este y que también se ven fuertemente influidos por las características del suelo), suban alrededor de 1,5 veces en el análisis de extracto saturado o en sonda de succión y 0,6-0,7 veces en el análisis de extracto 1:2.

Bien es cierto que existen iones de absorción lenta, que deben reconcentrarse un poco más en el entorno radical respecto a la SN entrante (Ca^{+2} , Mg^{+2} , SO_4^{-2} , B), otros de absorción rápida activa que han de tender a bajar respecto a la SN entrante (H_2PO_4^- , NH_4^+ , Mn), otros que dependen del balance vegetativo/generativo perseguido (NO_3^- , K^+) y otros cuya presencia en la solución del sustrato, al igual que los de rápida absorción, por motivos de solubilidad es baja y tienden a reducirse respecto a la SN entrante (H_2PO_4^- , Fe, Mn, Zn, Cu).

Además en todo esto tiene mucha influencia también las dinámicas de adsorción al complejo de cambio del suelo por parte de los cationes y fosfatos.

Figura 13. Sondas de succión instaladas a diferente profundidad, toma de muestras de la solución nutritiva fertilizante y extracción de la solución captada por la sonda de succión



Veamos los valores esperables para cada uno de los parámetros a analizar en la solución del suelo/sustrato, aunque se deba ir depurando y adaptando a cada circunstancia específica.

2.4.4. pH y bicarbonatos

El rango óptimo de pH podría establecerse en 5,8-6,8, y siendo el nivel de bicarbonatos aquel que posibilitara dicho valor de pH. Poder estar en el

valor de referencia de forma continuada en el tiempo depende de la reacción del suelo/sustrato, es decir de su pH. En cualquier caso si el pH no es favorable, hemos de procurar crear microambientes temporales y espaciales que posibiliten poder estar aunque no de forma continuada en el rango óptimo, mediante el ajuste del pH en la SN y, en su caso, estableciendo enmiendas previas al cultivo.

2.4.5. Conductividad eléctrica

El rango óptimo de CE es muy dependiente del valor que tenga la SN de entrada, y esta a su vez es muy dependiente del valor de CE del agua de riego.

El nivel de CE de la solución del suelo/sustrato aumentará cuando la planta tenga un ratio de absorción de agua superior a la absorción iónica total (considerando todos los iones globalmente), ya que se establece una concentración de solutos, y disminuirá en el caso contrario, ya que lo que sucede es una dilución de solutos.

Parece lógico pensar que si la CE de la solución del suelo/sustrato disminuye respecto a la de la SN de entrada, el cultivo está reclamando un mayor aporte nutricional. Otra cuestión es si económicamente esto interesa o no, en hidroponía siempre interesará, pero en cultivo en suelo no está tan claro.

Es más si la CE de la solución del suelo/sustrato, se mantiene respecto a la CE de la SN, cabe pensar que estamos en la misma situación anterior, es decir, que el cultivo sigue (aunque en menor medida que antes) reclamando un mayor aporte nutricional. Esto es así, porque seguro que en la SN existen componentes iónicos que se encuentran en exceso respecto a la demanda de la planta (cloruros, sodio o exceso de sulfatos procedentes del agua de riego, por ejemplo).

Si la CE de la solución del suelo/sustrato se mantiene respecto a la entrada, y sabemos que existen iones que se han reconcentrado, lógicamente habrá otros (fundamentalmente nutricionales como nitratos, potasio) que se habrán diluido, y que la planta, en cierta medida reclama en mayor cantidad.

De esta forma los valores de CE esperables en la solución del suelo/sustrato, dependen de la CE de la SN de entrada y del nivel de iones en exceso sobre la demanda de la planta que contenga (sodio, cloruros, fundamentalmente, y en casos particulares excesos de sulfatos, magnesio, calcio o sobrefertilizaciones). Así, y aunque depende de múltiples factores, para sistemas donde

se efectúe un adecuado manejo del riego, se pueden proponer los siguientes valores esperables de CE en la solución del suelo/sustrato (en dS/m):

CE de la SN	CE en extracto saturado/sonda	CE en extracto 1:2
1	1,0 - 1,5	0,4 - 0,6
2	2,2 - 3,5	1,0 - 1,4
3	3,5 - 5,0	1,4 - 2,0
4	5,0 - 8,0	2,0 - 3,2

2.4.6. Calcio y magnesio

Son elementos de absorción lenta y que deben mantener una adecuada relación entre sí. Los rangos óptimos a conseguir en la SN se pueden estimar en 3-5 mmol L⁻¹ de Ca⁺² y 1,5-2,5 mmol L⁻¹ de Mg⁺². Siempre con tendencia a los mayores niveles del rango con valores altos de Na⁺, altos aportes de K⁺ o en sistemas hidropónicos.

En la solución del suelo/sustrato se va a producir una reconcentración de estos elementos respecto a la entrada. De esta forma se pueden proponer los siguientes valores esperables (en mmol L⁻¹):

Ca ⁺² y Mg ⁺² en SN	Ca ⁺² y Mg ⁺² en ext. sat./sonda	Ca ⁺² y Mg ⁺² en ext. 1:2
2,0 / 1,0	2,5 - 4,0 / 1,5 - 3,0	1,0 - 1,6 / 0,6 - 1,2
3,0 / 1,5	4,0 - 7,0 / 2,5 - 5,0	1,6 - 2,8 / 1,0 - 2,0
4,0 / 2,0	5,0 - 9,0 / 3,5 - 7,0	2,0 - 3,6 / 1,4 - 2,8
5,0 / 2,5	7,0 - 12,0 / 4,5 - 9,0	2,8 - 4,8 / 1,8 - 3,6

Cuando no se pueda mantener en la SN un ratio 2:1 de Ca⁺²/Mg⁺², por exceso de Mg⁺² en el agua de riego por ejemplo, aunque interese también mantener en la solución del suelo/sustrato un ratio aproximado de doble calcio respecto a magnesio, no se podrá, y habrá que hacer unas interpretaciones diferentes.

Mencionar también que en condiciones normales el Mg⁺², en la solución del suelo, tiende a concentrarse más que el Ca⁺², fundamentalmente por la mayor fuerza de adsorción que tiene este último sobre los coloides arcillo húmicos del suelo/sustrato.

2.4.7. Nitratos y potasio

Ya se ha venido comentando la importancia que tiene la relación N/K en el enfoque y manejo nutricional en los sistemas tecnificados, y que sus niveles en la SN han de ajustarse en función del potencial del cultivo y de factores como especie, variedad, etapa fenológica, edad de la planta, clima, sintomatología de la plantación, condiciones de mercado, etc.

Es claro, que son los parámetros cuyo rango óptimo en la SN, y por tanto en la solución del suelo/sustrato, mayor variabilidad pueden tener.

En principio interesa que los niveles en la solución del suelo/sustrato, mantengan un ratio aproximado al fijado en la SN. Pero aquí hay que hacer una doble distinción:

- *Sustratos vs. suelos.* En sustratos los valores esperables de nitratos y potasio, además de mantener una relación entre ellos similar a la fijada en la SN, interesa que también mantengan unas concentraciones similares. En suelos, por motivos más económicos que fisiológicos, mantener concentraciones tan altas puede no resultar rentable (aunque siempre ha de estar ligado esto a un análisis de costos).

Como norma general se puede proponer que en suelos se mantengan unas concentraciones mínimas aproximadas de la mitad de lo aportado en la SN, y a partir de ahí estudiar si los costos permiten subir el aporte.

- *Suelos arcillosos vs. sustratos y resto de suelos.* De forma general, interesa, independientemente de los valores que se mantengan en la solución del suelo/sustrato, que el ratio entre ellos sea aproximadamente el mismo que el fijado en la SN. Esto es así en cultivo en sustrato (y más si se trata de sustratos inertes) y en suelos arenosos. En suelos arcillosos, una parte del potasio queda retenido por los coloides arcillosos, de forma que en la solución del suelo se muestran valores inferiores a los pretendidos.

En este tipo de suelo los valores esperados de K pueden estimarse hasta un mínimo aproximado de la mitad de lo que se establecería sin considerar este aspecto. Además en este tipo de suelos las variaciones de las concentraciones de K^+ siempre son mucho más lentas de lo que pueden ser las de NO_3^- .

De esta manera a modo de ejemplo, si aplicamos una SN que contiene 8 mmol L^{-1} de NO_3^- y 4 mmol L^{-1} de K^+ . Se podrían esperar, en condiciones normales de cultivo, los siguientes valores en la solución del suelo/sustrato:

- *Hidroponía*: nitratos ($7\text{-}12 \text{ mmol L}^{-1}$) y potasio ($3\text{-}6 \text{ mmol L}^{-1}$), y aproximadamente con doble concentración de nitratos que de potasio. Bien es cierto, que para cultivos sin suelo estas concentraciones serían insuficientes en la mayoría de los casos.
- *Suelo no arcilloso*: nitratos ($5\text{-}8 \text{ mmol L}^{-1}$; $2\text{-}3,2 \text{ mmol L}^{-1}$ en extracto 1:2) y potasio ($2,5\text{-}4 \text{ mmol L}^{-1}$; $1\text{-}1,6 \text{ mmol L}^{-1}$ en extracto 1:2), y aproximadamente con doble concentración de nitratos que de potasio.
- *Suelo arcilloso*: nitratos ($5\text{-}8 \text{ mmol L}^{-1}$; $2\text{-}3,2 \text{ mmol L}^{-1}$ en extracto 1:2) y potasio ($1,5\text{-}3 \text{ mmol L}^{-1}$; $0,6\text{-}1,2 \text{ mmol L}^{-1}$ en extracto 1:2), y aproximadamente con triple concentración de nitratos que de potasio.

2.4.8. Amonio

El amonio es un ión de rápida absorción y asimilación por parte de la planta, y además en condiciones normales de aireación, mediante la actuación de las bacterias nitrificantes, tiene tendencia a transformarse en nitratos en un plazo de tiempo más o menos corto.

De esta forma, y teniendo en cuenta además que su aporte en la SN en sistemas para fertirrigación no debe ser demasiado elevado, cabe esperar niveles de amonio en la disolución del suelo/sustrato nulos o muy bajos ($0\text{-}0,2 \text{ mmol L}^{-1}$). Es más, una presencia considerable de amonio en la solución del suelo ($> 0,2 \text{ mmol L}^{-1}$), transcurrido ya cierto tiempo tras el aporte de la SN, debe ser considerado como indicativo de situación de anoxia (asfixia radicular).

2.4.9. Fosfatos

El nivel de fósforo soluble en la solución del suelo es bajo. Este elemento tiene una enorme tendencia a inmovilizarse y quedar fijado en el suelo. En sustratos, cabe esperar niveles en la solución de sustrato en torno al

80-100 % del aportado. Es decir, si se aplican $1,5 \text{ mmol L}^{-1}$, es esperable tener $1,2\text{-}1,5 \text{ mmol L}^{-1}$.

En suelos, el nivel de fósforo en la solución de raíz es menor, pero dada la gran capacidad de la planta para absorberlo, tampoco es necesaria una gran cantidad. Aunque depende de pH, contenidos en coloides arcillosos y orgánicos, temperatura y presencia de otros iones, los niveles esperables de fosfatos en el extracto saturado son $0,3\text{-}0,8 \text{ mmol L}^{-1}$ ($0,1\text{-}0,3 \text{ mmol L}^{-1}$ en extracto 1:2).

2.4.10. Sodio y cloruros

Su presencia significativa tanto en la SN como en la solución del suelo/sustrato son indeseables. Resulta evidente que en condiciones normales se reconcentrarán siempre en la solución del suelo/sustrato, respecto a la SN de entrada.

Así, y aunque depende de múltiples factores, para sistemas donde se efectúe un adecuado manejo del riego, se pueden proponer los siguientes valores esperables en la solución del suelo/sustrato (en mmol L^{-1}), tanto para Cl^- como para Na^+ , ya que aunque este último sea un catión, la fuerza con la que es retenido por los coloides del suelo, es baja.

Na^+ y Cl^- en la SN	Na^+ y Cl^- en ext. sat./sonda	Na^+ y Cl^- en ext. 1:2
1	$1,5 - 3,0 / 1,5 - 3,0$	$0,6 - 1,2 / 0,6 - 1,2$
3	$4,0 - 7,0 / 4,0 - 8,0$	$1,6 - 2,8 / 1,6 - 3,2$
6	$8,0 - 14,0 / 8,0 - 16,0$	$3,2 - 5,6 / 3,2 - 6,4$
10	$14,0 - 22,0 / 14,0 - 28,0$	$5,6 - 8,8 / 5,6 - 11,2$

2.4.11. Sulfatos

El sulfato, al igual que calcio y magnesio, es un ión de absorción lenta por parte de la planta, y tiene un comportamiento en la solución del suelo similar a estos. Ahora bien, por su presencia en el agua de riego, a menudo es un ión que en la SN excede ampliamente la demanda de la planta, aunque esto no es tan problemático como en el caso de sodio o cloruros.

Así, y aunque depende de múltiples factores, para sistemas donde se efectúe un adecuado manejo del riego, se pueden proponer los siguientes valores esperables de SO_4^{2-} en la solución del suelo/sustrato (en mmol L^{-1}).

SO₄⁻² en la SN	SO₄⁻² en ext. sat./sonda	SO₄⁻² en ext. 1:2
1	1,5 - 3,0	0,6 - 1,2
3	4,0 - 8,0	1,6 - 3,2
6	8,0 - 14,0	3,2 - 5,6
10	14,0 - 22,0	5,6 - 8,8

2.4.12. Boro

El boro es un elemento de lenta absorción y muy soluble, por lo que tiene una tendencia muy similar a la del calcio en la solución del suelo. Los rangos óptimos a conseguir en la SN se pueden estimar en 0,2-0,5 ppm. Se pueden proponer los siguientes valores esperables (en ppm):

B en la SN	B en ext. sat./sonda	B en ext. 1:2
0,2	0,2 - 0,4	0,08 - 0,16
0,3	0,4 - 0,6	0,16 - 0,24
0,4	0,5 - 0,8	0,20 - 0,32
0,5	0,6 - 1,0	0,24 - 0,40

2.4.13. Micronutrientes metálicos

La cantidad de Fe, Mn, Zn y Cu en la solución del suelo/sustrato es muy baja. En sustratos inertes se puede esperar concentraciones similares a las aplicadas en la SN. En sustratos químicamente activos, las cantidades esperables bajan siendo niveles normales la solución de sustrato Fe (0,3-1 ppm), Mn (0,2-0,5 ppm), Zn (0,1-0,4 ppm) y Cu (0,1-0,2 ppm).

En la solución del suelo, los niveles en general son aún menores, aunque depende de la composición y pH del suelo. Por esta razón, frecuentemente en lugar de efectuar el seguimiento de los micronutrientes metálicos a través de análisis del extracto saturado o 1:2, se hace a través de los niveles de extraídos con DTPA (análisis de fertilidad), partiendo de la base de que al contrario que los macronutrientes, el efecto de almacén y suministro de alguno de los micronutrientes metálicos en determinados suelos, puede cubrir la demanda nutricional de cultivos intensivos durante mucho tiempo, e incluso de forma indefinida.

2.5. Frecuencia de muestreos

En general se podría establecer seguimiento analítico de la solución en sustratos cada 2-4 semanas y en suelos cada 4-6 semanas. Aunque todo depende del cultivo, y de la experiencia adquirida, efectivamente estos análisis podrían ser más frecuentes al inicio de los proyectos y poder distanciarse más en el tiempo conforme se tenga un control esperable de la situación, y donde la planilla de seguimiento de pH, CE y parámetros de riego ya nos aporte información de cuándo es adecuado efectuar un análisis de la solución del suelo.

Reducción de las pérdidas de nitrógeno en cultivos sin suelo

Juan José Magán Cañadas

Estación Experimental Cajamar

1. Introducción

La presencia de nitratos en el agua supone un grave problema tanto de salud pública como a nivel ambiental. Así, en humanos da lugar a una enfermedad denominada metahemoglobinemia, que consiste en la presencia de un nivel anormalmente alto de metahemoglobina en la sangre. Esta sustancia tiene una mayor afinidad por el oxígeno que la hemoglobina, lo que reduce su liberación en los tejidos y puede originar hipoxia tisular e incluso la muerte. En el medioambiente el exceso de nitratos en las aguas superficiales provoca eutrofización, consistente en un fuerte desarrollo de algas que impide la penetración de la luz hasta el fondo, lo que finalmente origina el agotamiento del oxígeno en esa zona y la desaparición de la mayoría de las especies del ecosistema.

Consciente de este y otros problemas que afectan al agua, la Unión Europea (UE) aprobó la Directiva Marco del Agua (Directiva 2000/60/EC del 23 de octubre de 2000), cuyo objetivo era que toda el agua en la UE estuviera limpia en 2015. Dicha directiva incorpora la Directiva de Nitratos, por la cual se establecen las denominadas Zonas Vulnerables a la Contaminación por Nitratos, en las que es necesario implementar planes de acción que permitan reducir el nivel de contaminación. Desgraciadamente, en la provincia de Almería se han establecido varias de estas zonas vulnerables, que vienen a coincidir aproximadamente con las de producción hortícola intensiva, debido a la existencia de niveles excesivos de nitratos en las aguas subterráneas originados por la lixiviación procedente de los invernaderos. En el artículo se aportan algunas ideas para el manejo de los cultivos sin suelo (que son los que más están contaminando por unidad de superficie), con el fin de reducir el aporte y la lixiviación de nitratos procedentes de estos sistemas.

2. Sistemas a solución perdida

La concentración a establecer de un determinado ion en la solución de aporte se puede calcular matemáticamente mediante la siguiente expresión (Magán, 1999):

$$C_s = C_a * (1 - FL) + C_d * FL = \frac{C_a * (1 - FL)}{1 - R * FL} \quad [1]$$

donde:

Cs es la concentración del ion para el que se realiza el cálculo en la solución de aporte.

Ca es la concentración de absorción para ese ion, es decir, la cantidad absorbida del mismo por el cultivo por cada litro de agua absorbida.

Cd es la concentración del ion en el drenaje.

FL es la fracción de lixiviación establecida.

R es el cociente entre Cd y Cs.

El cociente R depende de la facilidad con la cual la planta es capaz de absorber un determinado ion. En la Tabla 1 se muestran las relaciones que usualmente aparecen entre las concentraciones de aporte y drenaje. Se observa que los iones monovalentes se absorben con avidez y no hay ningún problema en que aparezcan a menor concentración en la solución de drenaje que en la de aporte. Sin embargo, los divalentes son absorbidos con mayor dificultad y deben acumularse en el drenaje con respecto al aporte para que la planta pueda absorber todo su potencial y no se produzca deficiencia. En el caso del nitrato, como ion monovalente que es, se absorbe fácilmente (aunque no tanto como el amonio), a pesar de lo cual resulta frecuente encontrarlo a mayor concentración en el drenaje, lo que indica que es posible reducir su concentración en la solución de aporte sin que se vea afectado el cultivo.

Tabla 1. Relaciones más usuales entre las concentraciones iónicas en las soluciones de aporte y drenaje en un sustrato inerte

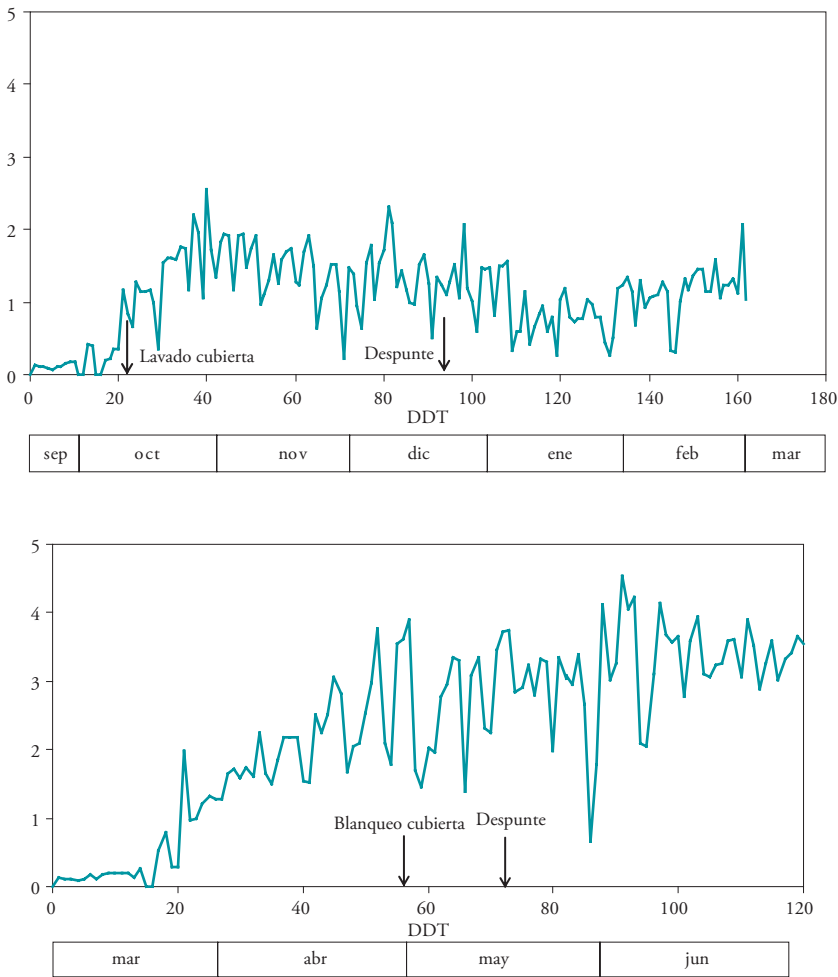
ION	Concentración en la solución de aporte (%)	Concentración en la solución de drenaje (%)
NO ₃ ⁻	100	75-125
NH ₄ ⁺	100	0-50
H ₂ PO ₄ ⁻	100	50-75
K ⁺	100	50-100
Ca ⁺⁺	100	125-200
Mg ⁺⁺	100	150-250
SO ₄ ⁼	100	150-250
pH		+ 0,5 Ud
CE		+ 1-2 Ud

Fuente: Cánovas (1998) y Casas (1999).

Para poder ajustar el aporte de nitrógeno al cultivo y, por tanto, limitar las pérdidas de dicho nutriente, resulta importante conocer su concentración de absorción, atendiendo a la Ecuación 1. Es sabido que este parámetro varía sobre todo en función de la etapa de desarrollo del cultivo y de las condiciones ambientales. Con el fin de conocer su evolución a lo largo del ciclo, se realizó un seguimiento de la cantidad de nitrógeno aportada, absorbida y lixiviada en diversos cultivos en la Estación Experimental Cajamar en Almería (Rodríguez, 2008). Para ello se llevaron a cabo balances semanales en varias bandejas de control del drenaje, midiendo diariamente el volumen de solución aportada y drenada y analizando cada semana una muestra de ambas soluciones obtenida mediante mezcla ponderada en función del volumen diario. En este artículo se muestran datos de dos cultivos de tomate correspondientes a ciclos distintos, uno de otoño-invierno y otro de primavera, que han sido publicados por Thompson *et al.* (2013).

En el Gráfico 1 se muestra la evolución de la transpiración diaria del cultivo en cada uno de los ciclos. Las condiciones ambientales fueron claramente diferentes ya que, mientras que en el ciclo de otoño-invierno la transpiración con cultivo plenamente desarrollado se situó entre 1 y 2 mm aproximadamente, en primavera fue de 3 a 4 mm, lo que debió tener un claro efecto sobre las concentraciones de absorción.

Gráfico 1. Evolución de la transpiración diaria del cultivo en el ciclo de otoño-invierno (arriba) y primavera (abajo). En mm d⁻¹



Fuente: Thompson *et al.* (2013).

En lo que se refiere a la fracción de lixiviación establecida (Gráfico 2), esta resultó similar en los dos cultivos. En concreto, fue de un 24 % en el global del ciclo en ambos casos. No obstante, durante aproximadamente la primera semana de cultivo se mantuvo en niveles muy altos, superiores al 60 %, ya que se aportaba un riego diario que resultó claramente excedentario. Posteriormente, descendió bruscamente este porcentaje ya que el cultivo empezó a crecer y a aumentar su área foliar, llegando incluso a no obtenerse nada de

drenaje con el fin de estimular el desarrollo radical. Después de tres semanas aproximadamente se empezó a regularizar el riego, tratando de mantener la fracción de lixiviación en torno al objetivo del 25 %.

Gráfico 2. Evolución de la fracción de lixiviación diaria en el ciclo de otoño-invierno (arriba) y primavera (abajo). En porcentaje



Fuente: Thompson *et al.* (2013).

En el cultivo de otoño-invierno se partió de una concentración de absorción baja (inferior a 10 mmol L⁻¹) debido al escaso desarrollo inicial y a la alta demanda evaporativa ambiental, pero aumentó rápidamente hasta

15 mmol L⁻¹ en las semanas posteriores una vez ancladas las raíces en el sustrato definitivo e iniciado un fuerte desarrollo vegetativo (Gráfico 3). A partir de dicho valor fue reduciéndose paulativamente hasta enero, cuando se alcanzó un mínimo en torno a 9 mmol L⁻¹, como consecuencia de la máxima carga de fruto y el escaso crecimiento. Finalmente, una vez iniciada la recolección de fruto y activado el desarrollo de tallos secundarios con el aumento de la radiación, se produjo un incremento significativo de la concentración de absorción hasta valores superiores a 15 mmol L⁻¹ al final del ciclo.

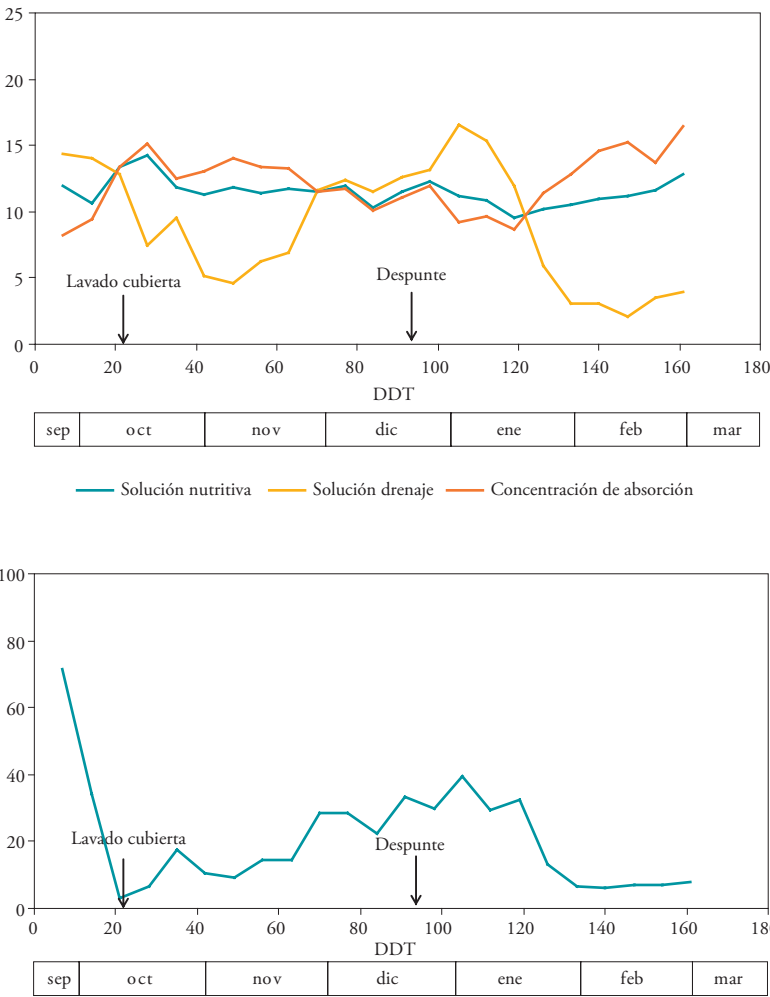
En cuanto a la concentración de nitrógeno en la solución nutritiva de aporte, esta resultó relativamente estable, con valores que oscilaron durante todo el ciclo entre 10 y 15 mmol L⁻¹. Por el contrario, la concentración en el drenaje sí sufrió fuertes oscilaciones, resultando claramente inferior a la de aporte en los periodos en los que la concentración de absorción fue relativamente elevada (por encima de unos 12 mmol L⁻¹) (entre los 20 y 60 DDT y los 120 y 160 DDT aproximadamente). En estos periodos se registraron pérdidas de nitrógeno inferiores al 20 %, e incluso a veces menores del 10 %. Frente a ello, cuando la concentración de aporte fue mayor que la de absorción y, por tanto, resultó menor que la de drenaje, las pérdidas aumentaron al 30-40 % aproximadamente.

En el cultivo de primavera se registró una concentración de absorción superior a 20 mmol L⁻¹ en la primera semana de cultivo (Gráfico 4), posiblemente como consecuencia de un déficit nutricional arrastrado del semillero. Sin embargo, rápidamente descendió a valores de 10-12 mmol L⁻¹ en las semanas posteriores hasta que se inició la fase de desarrollo vegetativo más intenso, momento en el cual se alcanzaron concentraciones de absorción de unos 16 mmol L⁻¹. A partir de los 40 DDT disminuyó paulatinamente como consecuencia del aumento de la demanda evaporativa ambiental y la ralentización del crecimiento derivada del incremento de la carga de fruto, hasta alcanzarse valores entre 6 y 7 mmol L⁻¹ a partir de los 60 DDT hasta el final del cultivo.

La concentración de nitrógeno en la solución de aporte se mantuvo en general alta en las primeras semanas de cultivo, con un valor máximo de 15 mmol L⁻¹ a los 40 DDT aproximadamente. A partir de entonces se fue disminuyendo progresivamente hasta unos 8 mmol L⁻¹ a partir de los 70 DDT, con el fin de ajustarse a la reducción experimentada por la concentración de absorción y reducir así las pérdidas de nitrógeno. A pesar de ello, estas resultaron importantes, situándose durante casi todo el experimento por encima

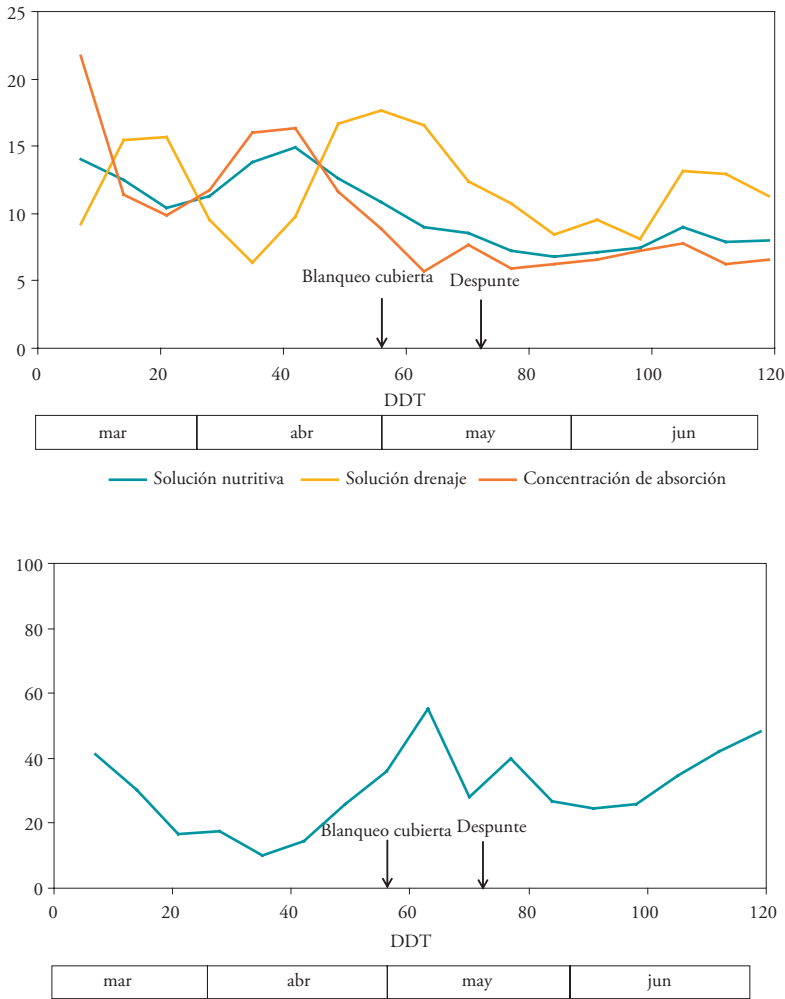
del 20 %, con valores incluso superiores al 40 % en algunas semanas. Esto es lógico ya que, salvo en periodos muy concretos, la concentración de aporte fue superior a la de absorción.

Gráfico 3. Evolución durante el ciclo de otoño-invierno de la concentración de nitrógeno media semanal en la solución nutritiva y el drenaje (mmol L^{-1}), así como de la concentración de absorción de nitrógeno media semanal (arriba) y del porcentaje de nitrógeno lixiviado (abajo)



Fuente: Thompson *et al.* (2013).

Gráfico 4. Evolución durante el ciclo de primavera de la concentración de nitrógeno media semanal en la solución nutritiva y el drenaje (mmol L⁻¹), así como de la concentración de absorción de nitrógeno media semanal (arriba) y del porcentaje de nitrógeno lixiviado (abajo)



Fuente: Thompson *et al.* (2013).

La concentración de absorción de nitrógeno media fue considerablemente mayor en el ciclo de otoño-invierno que en el de primavera (Tabla 2) debido a la menor demanda evaporativa existente en el primer ciclo. De este modo, a pesar de reducir la concentración de aporte en primavera, no se consiguió que esta fuera menor que su correspondiente concentración de absorción, lo que

conllevo que se registrase una mayor concentración media en drenaje que en aporte y que las pérdidas de nitrógeno se elevasen a un 31 % (Tabla 3). Frente a ello, en otoño-invierno la concentración de nitrógeno media en el drenaje fue solo un 74 % de la de aporte y las pérdidas se redujeron a un 18 %.

Tabla 2. Valores medios en cada uno de los ciclos de cultivo evaluados de la concentración de absorción de nitrógeno, así como de la concentración de dicho elemento en las soluciones de aporte y drenaje y la relación entre las concentraciones de drenaje y aporte

Cultivo	Concentración absorción N (mmol L ⁻¹)	Concentración N aportada (mmol L ⁻¹)	Concentración N drenaje (mmol L ⁻¹)	Relación concentración N drenaje/ concentración N aportada
Otoño-invierno	12,5	11,5	8,5	74
Primavera	8,4	9,2	11,8	128

Fuente: Thompson *et al.* (2013).

Tabla 3. Volumen acumulado de agua aportada y drenada y cantidad total de nitrógeno aportado, absorbido y lixiviado, así como porcentaje medio de drenaje y de nitrógeno lixiviado en cada ciclo de cultivo

Cultivo	Agua aportada (mm)	Drenaje (mm)	Drenaje (%)	N aportado (kg ha ⁻¹)	N absorbido (kg ha ⁻¹)	N lixiviado (kg ha ⁻¹)	N lixiviado (%)
Otoño-invierno	235	58	24	379	311	68	18
Primavera	362	86	24	463	319	144	31

Fuente: Thompson *et al.* (2013).

A la vista de estos resultados se propone que en cultivos a solución perdida, la concentración de nitratos en la solución de aporte se reduzca hasta tal punto que la concentración en el drenaje no suponga más de un 75 % de la primera. De este modo pueden conseguirse pérdidas de nitrógeno inferiores al 20 %, frente al 40 % que se está alcanzando en la actualidad en los invernaderos comerciales por término medio. No obstante, un mayor trabajo experimental sería necesario con el fin de determinar cuál es la máxima reducción posible de la concentración de nitrógeno en el drenaje sin que se originen pérdidas productivas, especialmente cuando se emplean aguas de calidad mediocre que obligan a aplicar altos porcentajes de drenaje.

3. Sistemas cerrados

Para reducir al máximo las pérdidas de nitrógeno en cultivo sin suelo, resulta necesario reconvertir los sistemas a solución perdida en cerrados, en los cuales se recoge y reutiliza el drenaje emitido, evitando su emisión al medio ambiente. Esto permite minimizar el gasto de agua y fertilizantes, así como la lixiviación de nutrientes, y hace factible el establecimiento de altos porcentajes de drenaje sin que se produzca un despilfarro, lo que posibilita el mantenimiento de concentraciones de nutrientes más bajas de lo habitual y la acumulación de una mayor concentración de iones nocivos en la solución sin que se afecte el cultivo.

No obstante, los sistemas cerrados también presentan inconvenientes. Así, con el fin de mantener constante la composición de la solución recirculante, requieren ajustar muy bien el aporte de nuevos nutrientes mediante el agua de refresco y los fertilizantes a la absorción del cultivo, de forma que se añadan en una concentración igual a su correspondiente concentración de absorción. Dado que resulta imposible conocer exactamente el valor de dichas concentraciones de absorción, la reutilización del drenaje tiende a producir desajustes nutricionales que implican la necesidad de realizar análisis frecuentes para reequilibrar la solución. Por otro lado, los sistemas cerrados pueden favorecer la dispersión de ciertos patógenos a través de la solución recirculante, por lo que se aconseja la desinfección de esta para reducir el riesgo. Sin embargo, el coste de la desinfección resulta elevado, pudiendo impedir la consecución de un balance económico positivo mediante la recirculación. Finalmente, la reutilización completa del drenaje sin que se produzcan acumulaciones excesivas de iones nocivos, requiere disponer de aguas de muy buena calidad, las cuales son poco frecuentes en el sureste peninsular. El empleo de aguas mediocres obliga al descarte parcial de la solución recirculante, obteniéndose así un sistema semicerrado que hay que manejar cuidadosamente para evitar pérdidas productivas y una lixiviación importante de nutrientes.

La preparación de la solución nutritiva en un sistema cerrado puede llevarse a cabo de dos formas, bien mezclando en primer lugar el drenaje con agua exterior y completando a continuación dicha solución mediante la adición de los fertilizantes, o bien obteniendo una solución previa a base del agua exterior y los fertilizantes ajustada a las necesidades de absorción del cultivo, a la que se añade el drenaje. Con la primera estrategia se asegura una determinada conductividad eléctrica en la solución final y, para reajustar su composición, es suficiente con aportar los nutrientes al sistema en la misma

relación que las concentraciones de absorción entre sí. Sin embargo, tiene el problema de que, si se produce la acumulación de algún ion por aporte excesivo del mismo y teniendo en cuenta que se ha fijado el límite de conductividad de la solución, se reducirá el aporte mediante fertilizantes del resto de nutrientes y disminuirá su concentración progresivamente, pudiéndose alcanzar niveles críticos para el desarrollo normal del cultivo. Esto se solventa de la segunda forma ya que con ella se mantiene constante un aporte definido de cada nutriente. Por supuesto presenta el inconveniente de que no permite asegurar una determinada conductividad ya que esta aumentará o disminuirá en el caso de que los nutrientes se aporten en mayor o menor cantidad respectivamente que las necesidades del cultivo, por lo que es necesario ajustar cuantitativamente el aporte de nutrientes a las concentraciones de absorción.

La primera estrategia es más adecuada cuando se dispone de agua de excelente calidad ya que, en este caso, apenas se acumulan las sales nocivas (principalmente sodio y cloruros). Sin embargo, la presencia en el agua de un ion a mayor concentración que su correspondiente concentración de absorción provocará una acumulación paulatina del mismo, de forma que puede resultar conveniente la segunda estrategia ya que el aumento de la salinidad se controlará fácilmente mediante medidas de conductividad y se pueden fijar criterios prácticos basados en esta que nos indiquen cuándo es necesario descartar la solución nutritiva.

Con el fin de definir una estrategia optimizada de manejo en sistemas semicerrados haciendo uso de aguas de calidad mediocre, Massa *et al.* (2010) compararon en condiciones de clima mediterráneo y con cultivo de tomate en ciclo de primavera-verano tres estrategias diferentes de recirculación más una cuarta a solución perdida, que fueron:

- Estrategia A: mezcla del drenaje con una solución ajustada a las concentraciones de absorción del cultivo y descarte de la solución recirculante al alcanzar una conductividad eléctrica de $4,5 \text{ dS m}^{-1}$. En este caso se mantenía constante la concentración de nutrientes, mientras que la de cloruro sódico aumentaba progresivamente.
- Estrategia B: mezcla del drenaje con agua nueva y adición de fertilizantes para mantener una conductividad de 3 dS m^{-1} . La solución recirculante se renovaba cuando su concentración de nitratos era inferior a 1 mmol L^{-1} . En este caso disminuía progresivamente la concentración de nutrientes a la vez que aumentaba la de cloruro sódico.

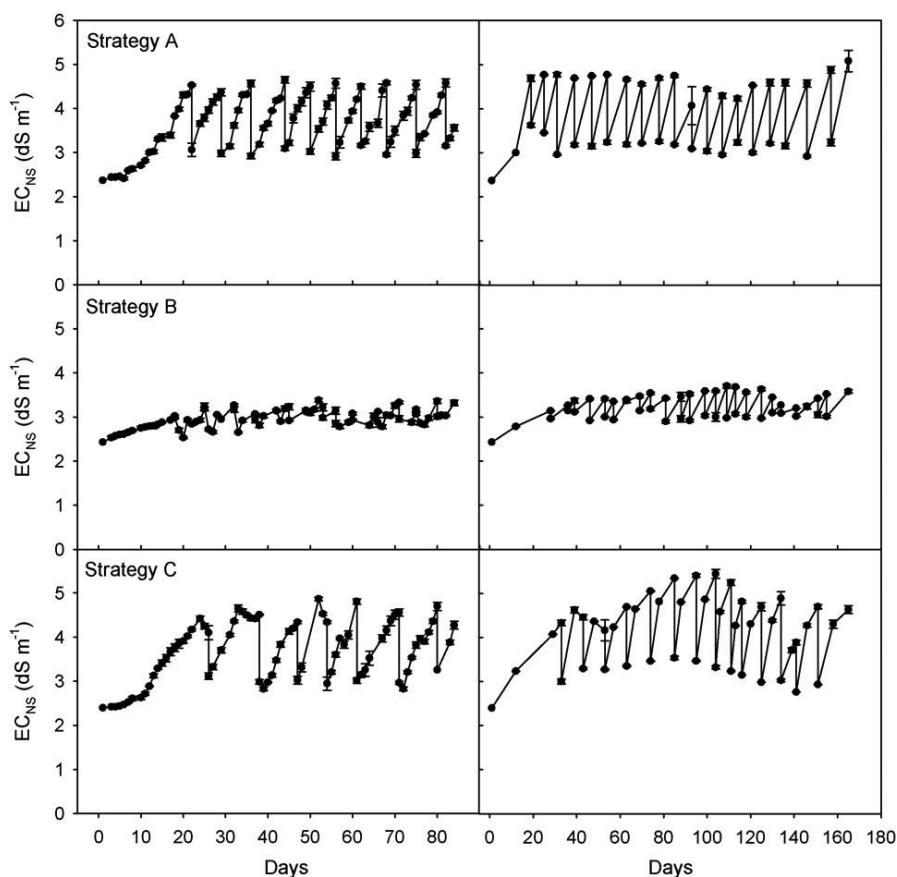
- Estrategia C: combinación de las dos estrategias anteriores. Inicialmente se manejaba como la estrategia A y, cuando se alcanzaba una conductividad de $4,5 \text{ dS m}^{-1}$, se empezaba a manejar como en la B, manteniéndose la conductividad de la solución recirculante en $4,5 \text{ dS m}^{-1}$ y descartándose esta cuando la concentración de nitratos bajaba de 1 mmol L^{-1} . En este caso la concentración de cloruro sódico aumentaba progresivamente, mientras que la de nutrientes se mantenía constante hasta una conductividad de $4,5 \text{ dS m}^{-1}$ y disminuía progresivamente una vez realizado el cambio de estrategia.
- Estrategia D: sistema a solución perdida.

Se utilizó agua de $1,5 \text{ dS m}^{-1}$ de conductividad con una concentración de cloruro sódico de $9,5 \text{ mmol L}^{-1}$, la cual es, sin duda, un agua problemática para su uso en recirculación.

En el Gráfico 5 se muestra la evolución de la conductividad eléctrica de la solución recirculante en cada una de las estrategias comparadas. Se observa que la mayor estabilidad de este parámetro se alcanzó con la estrategia B, aunque requirió una mayor frecuencia de descarte (cada 6,5 días de media en la estrategia B frente a 8,6 y 12 días en las estrategias A y C respectivamente). La mayor conductividad media se registró en la estrategia C ($3,7$ y $4,1 \text{ dS m}^{-1}$ en 2005 y 2006 respectivamente), teniendo en cuenta que en la estrategia A fue de $3,6$ y $3,9 \text{ dS m}^{-1}$ y en la B de $3,0$ y $3,2 \text{ dS m}^{-1}$.

En cuanto a la concentración de nitrógeno nítrico, esta fue más estable en la estrategia A (Gráfico 6). En las estrategias B y C se produjeron rápidos descensos de dicha concentración cuando se mezclaba el drenaje con agua nueva y se trataba de mantener la conductividad constante en 3 dS m^{-1} en la estrategia B y $4,5 \text{ dS m}^{-1}$ en la C, aumentando rápidamente al llevarse a cabo la renovación de la solución recirculante.

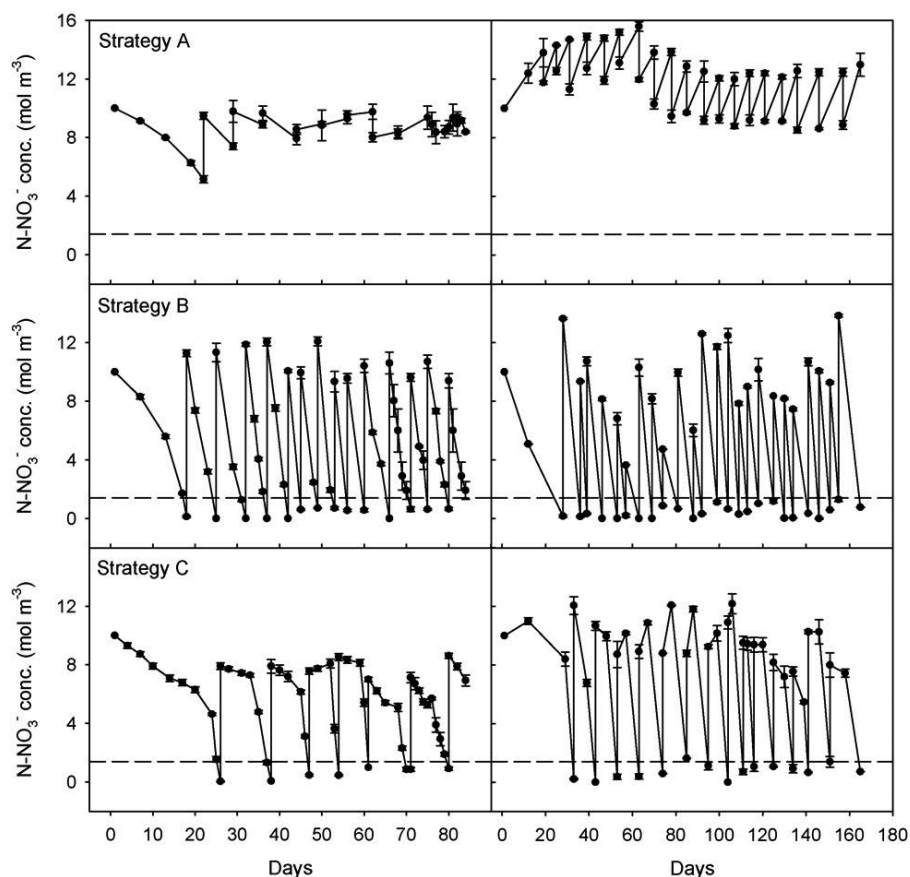
Gráfico 5. Evolución de la conductividad eléctrica en la solución recirculante (EC_{ns}) en cultivo sin suelo semicerrado de tomate de invernadero llevado a cabo en 2005 (izda.) y 2006 (dcha.) con diferentes estrategias de fertirrigación (A-C)



* Los puntos representan los valores medios ($\pm$ error estándar) de tres repeticiones. Los picos de rápido descenso de la conductividad representan la renovación de la solución nutritiva.

Fuente: Massa *et al.* (2010).

Gráfico 6. Evolución de la concentración de N-NO_3^- en la solución recirculante en cultivo sin suelo semicerrado de tomate de invernadero llevado a cabo en 2005 (izda.) y 2006 (dcha.) con diferentes estrategias de fertirrigación (A-C)



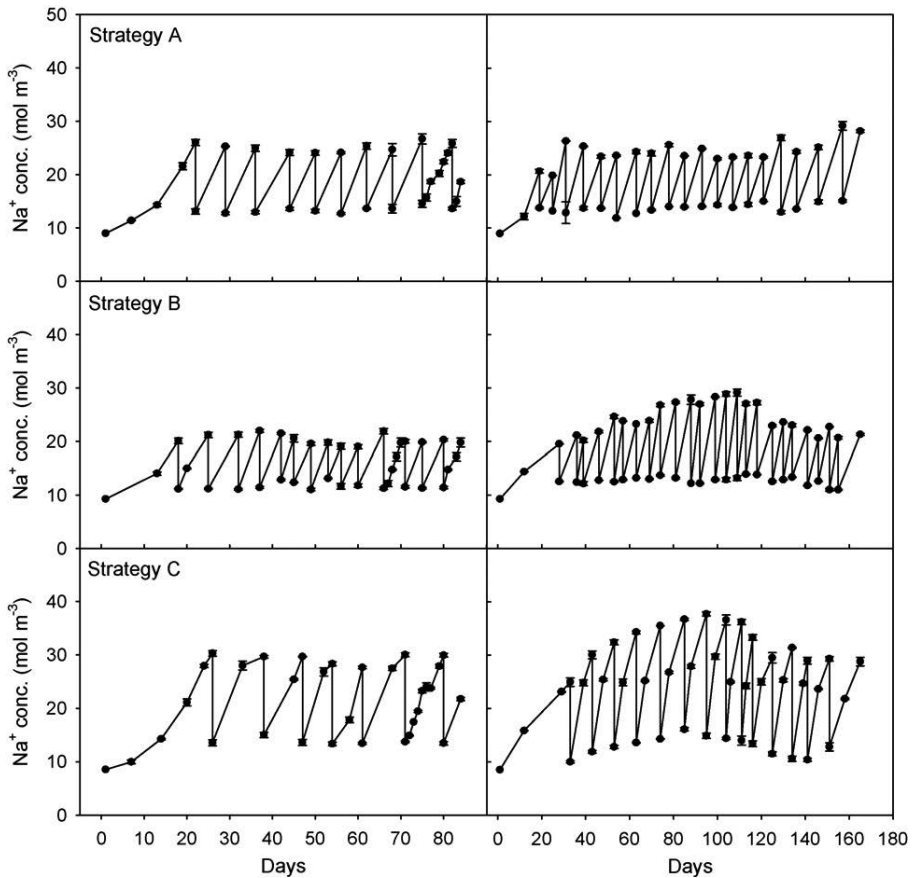
* Los puntos representan los valores medios ($\pm$ error estándar) de tres repeticiones. Los picos de rápida variación de la concentración de N-NO_3^- representan la renovación de la solución nutritiva. En todas las gráficas, la línea discontinua representa el límite impuesto a la concentración de N-NO_3^- del agua residual eliminada al medioambiente por la legislación italiana actual ($1,42 \text{ mmol L}^{-1}$).

Fuente: Massa *et al.* (2010).

La evolución de la concentración de Na^+ describió un diente de sierra en los tres tratamientos, de forma que aumentaba rápidamente conforme se recirculaba la solución y descendía bruscamente al descartar esta (Gráfico 7). La menor concentración media se registró en la estrategia B (15,9 y 18,3 mmol L^{-1} en 2005 y 2006 respectivamente), seguida de la A (18,3 y 18,8 mmol L^{-1} en

2005 y 2006 respectivamente), mientras que la C fue la que mostró una mayor concentración (21,3 y 23,2 mmol L⁻¹ en 2005 y 2006 respectivamente).

Gráfico 7. Evolución de la concentración de Na⁺ en la solución recirculante en cultivo sin suelo semicerrado de tomate de invernadero llevado a cabo en 2005 (izda.) y 2006 (dcha.) con diferentes estrategias de fertirrigación (A-C)



* Los puntos representan los valores medios ($\pm$ error estándar) de tres repeticiones. Los picos de rápido descenso de la concentración de Na⁺ representan la renovación de la solución nutritiva.

Fuente: Massa *et al.* (2010).

No hubo diferencias significativas en la cantidad de agua absorbida por el cultivo entre tratamientos recirculantes (Tabla 4). Sin embargo, el agua descartada fue significativamente mayor en la estrategia B que en la A, y en

esta, a su vez, mayor que en la C, lo cual está directamente relacionado con la mayor frecuencia de renovación de la solución. Sin embargo, el gasto de nitrógeno fue significativamente menor en la estrategia B que en la C, y en esta, a su vez, menor que en la A, lo cual fue debido, por un lado, a la escasa lixiviación de este nutriente conseguida mediante las estrategias B y C (menos del 5 % en ambas) y, por otro, a la menor absorción registrada en la estrategia B con respecto a las otras dos. Desde un punto de vista del aprovechamiento del nitrógeno, la estrategia A no fue adecuada ya que conllevó pérdidas de casi un 30 %, aunque resultó claramente más favorable que la estrategia a solución perdida, en la que las pérdidas alcanzaron casi el 60 %.

Tabla 4. Influencia de la estrategia de fertirrigación sobre el balance de agua y nitrógeno (N-NO_3^-) en cultivo sin suelo semicerrado (estrategias A-C) y abierto (estrategia D) de tomate de invernadero llevado a cabo en 2005 y 2006

	Estrategia A	Estrategia B	Estrategia C	Estrategia D
Experimento 2005				
Agua absorbida ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$)	3.517 b	3.428 b	3.586 ab	3.643 a
Agua eliminada ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$)	1.960 b	2.680 c	1.420 d	7.198 a
Agua usada ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$)	5.477 c	6.108 b	5.006 d	10.841 a
N absorbido (kg ha^{-1})	432 b	384 c	455 b	500 a
N lixiviado (kg ha^{-1})	168 b	14 c	22 c	716 a
N usado (kg ha^{-1})	600 b	398 d	477 c	1.215 b
Experimento 2006				
Agua absorbida ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$)	6.470 a	6.524 a	6.482 a	
Agua eliminada ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$)	3.200 b	4.000 a	2.400 c	
Agua usada ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$)	9.670 b	10.524 a	8.882 c	
N absorbido (kg ha^{-1})	879 a	564 c	660 b	
N lixiviado (kg ha^{-1})	371 a	23 b	24 b	
N usado (kg ha^{-1})	1.250 a	587 c	684 b	

* El agua usada se computó como la suma del agua absorbida y la eliminada, mientras que la absorción de N-NO_3^- se calculó como la diferencia entre el nitrógeno usado y el lixiviado. Dentro de una misma fila los valores medios ($n=3$ = seguidos de letras distintas son significativamente diferentes ($p<0,05$) de acuerdo con el test ANOVA y LSD.

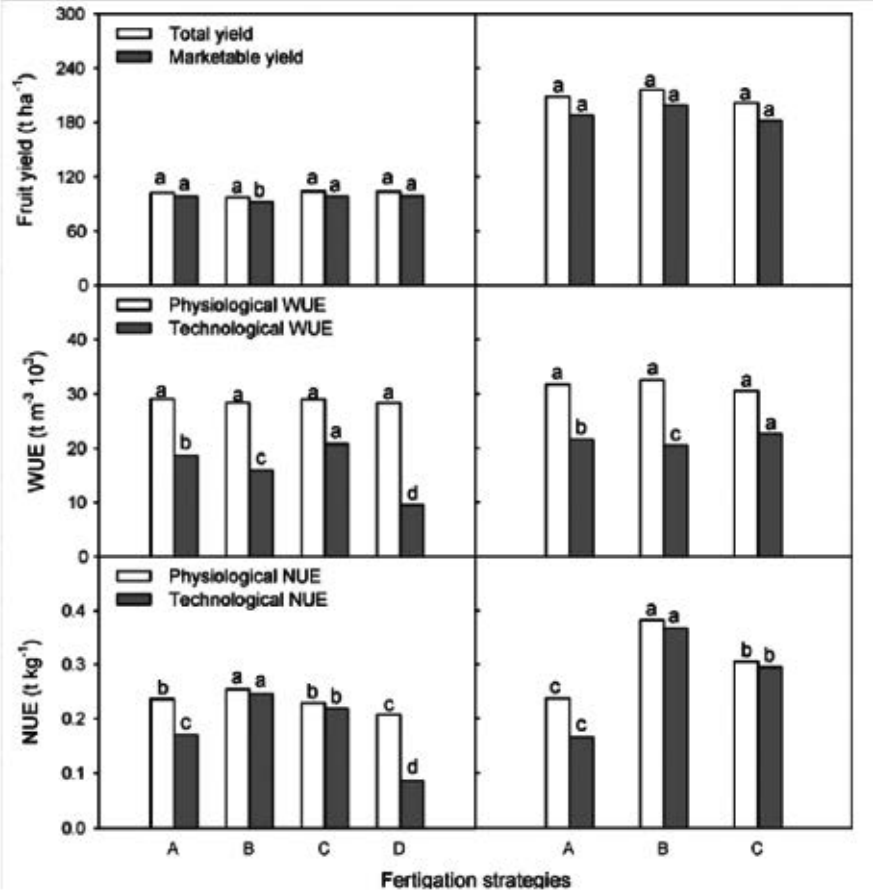
Fuente: Massa *et al.* (2010).

Puede decirse que no se produjeron diferencias de producción entre tratamientos ya que, aunque en 2005 la producción comercial de la estrategia B fue significativamente menor que la del resto de tratamientos, al año siguiente (en el que se realizó un experimento de mayor duración) se consiguió optimizar el manejo, evitándose la aparición de dichas diferencias (Gráfico 8). La eficiencia tecnológica en el uso del agua (el ratio entre la producción y el agua usada) fue significativamente mayor en la estrategia C, como consecuencia de sus menores necesidades de descarte, mientras que la del nitrógeno (el ratio entre la producción y el nitrógeno usado) fue mayor en la estrategia B, debido a la baja lixiviación propiciada y su menor absorción por parte del cultivo. En este sentido cabe decir que el resto de estrategias tendieron a provocar un consumo de lujo de nitrógeno que no derivó en una mayor producción. Por otro lado, resulta reseñable que la existencia puntual de una baja concentración de nitrógeno en las estrategias B y C justo antes de cada descarte no afectó negativamente al cultivo. Esto puede explicarse por la existencia de una reserva de nutrientes en la planta y su capacidad de removilización, con las que puede hacer frente a bajas concentraciones de aporte durante varios días.

La estrategia de recirculación a emplear dependerá del objetivo perseguido. Si es prioritario el ahorro de agua, resultará preferible la estrategia C pero, si es más importante minimizar el gasto de nitrógeno, se deberá utilizar la estrategia B. En esta elección también se deberá tener en cuenta la especie y variedad cultivada. Dado que con la estrategia B se consigue mantener una menor conductividad eléctrica y de forma más estable, resultará aconsejable cuando se cultiven especies sensibles a la salinidad, así como variedades susceptibles a ciertas fisiopatías agravadas por la salinidad (necrosis apical) o por los cambios bruscos de conductividad (rajado).

En definitiva, puede decirse que es posible recircular la solución nutritiva en condiciones de clima mediterráneo empleando aguas de calidad mediocre sin que se produzcan pérdidas productivas y consiguiendo unas pérdidas de nitrógeno totalmente aceptables.

Gráfico 8. Productividad (fruit yield) y eficiencia en el uso del agua (WUE) y el nitrógeno (NUE) tanto fisiológica como tecnológica en cultivo sin suelo de tomate de invernadero llevado a cabo en 2005 (izda.) y 2006 (dcha.) con diferentes estrategias de fertirrigación (A-D)



* La eficiencia fisiológica y tecnológica en el uso del agua y el nitrógeno se computó, respectivamente, como el ratio entre la cosecha total de fruto y la absorción de agua o nitrógeno o bien entre dicha cosecha y el uso total de agua o nitrógeno.

Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) de acuerdo con el test ANOVA y LSD. Se realizó un test ANOVA independiente para cada experimento.

Fuente: Massa *et al.* (2010).

Referencias bibliográficas

- CÁNOVAS, F. (1998): «Gestión de riegos y fertirrigación en invernadero»; en PÉREZ-PARRA, J. y CUADRADO, I. M., ed.: *Tecnología de invernaderos II. Curso Superior de Especialización*. Almería, Consejería de Agricultura y Pesca, FIAPA y Caja Rural de Almería; pp. 237-250.
- CASAS, A. (1999): «Seguimiento analítico de los cultivos: características de la zona que condicionan la solución nutritiva. Ajustes específicos»; en FERNÁNDEZ, M. y CUADRADO, I. M., ed.: *Cultivos sin suelo II. Curso Superior de Especialización*. Almería, Consejería de Agricultura y Pesca, FIAPA y Caja Rural de Almería; pp. 267-286.
- MAGÁN, J. J. (1999): «Sistemas de cultivo en sustrato: a solución perdida y con recirculación del lixiviado»; en FERNÁNDEZ, M. y CUADRADO, I. M., ed.: *Cultivos sin suelo II. Curso Superior de Especialización*. Almería, Consejería de Agricultura y Pesca, FIAPA y Caja Rural de Almería; pp. 173-206.
- MASSA, D.; INCROCCI, L.; MAGGINI, R.; CARMASSI, G.; CAMPIOTTI, C. A. y PARDOSSI, A. (2010): «Strategies to decrease water drainage and nitrate emission from soilless cultures of greenhouse tomato»; *Agricultural Water Management* 97(7); pp. 971-980.
- RODRÍGUEZ, J. S. (2008): «Cuantificación de las pérdidas de nitratos por lixiviación en cultivos sin suelo en el sureste español»; *Tesis doctoral*. Universidad de Almería.
- THOMPSON, R. B.; GALLARDO, M.; RODRÍGUEZ, J. S.; SÁNCHEZ, J. A. y MAGÁN, J. J. (2013): «Effect of N uptake concentration on nitrate leaching from tomato grown in free-draining soilless culture under Mediterranean conditions»; *Scientia Horticulturae* (150); pp. 387-398.

Uso de sensores de humedad en suelo para mejorar el manejo del riego en cultivos de invernadero

Marisa Gallardo y Rodney B. Thompson

Universidad de Almería

1. Introducción

La programación del riego consiste en la toma de decisiones sobre cuánto y cuándo regar. A nivel comercial, la programación de riego se basa normalmente en la experiencia de agricultores y/o técnicos. Con un manejo del riego basado en la experiencia es difícil asegurar que se cubran exactamente las necesidades hídricas del cultivo. A escala de explotación, tanto el riego deficitario como el excedentario pueden resultar en la reducción del rendimiento y de la calidad; además, el riego excedentario ocasiona pérdidas innecesarias de agua y nutrientes. A escala regional, el riego excedentario se asocia normalmente a problemas ambientales como la contaminación con nutrientes de aguas superficiales y subterráneas, sobreexplotación de acuíferos, salinización de suelos, ascenso de la tabla freática e intrusión marina en zonas costeras.

En la actualidad hay dos tendencias en la producción hortícola que presionan a los agricultores a adoptar mejoras en las prácticas del manejo del riego: (i) el desarrollo y adopción de métodos de producción con impacto ambiental mínimo, y (ii) la exigencia de mayor control sobre los métodos de producción para cumplir con la demanda de los consumidores hacia una mayor calidad de los productos. Un manejo óptimo del riego es fundamental para el cumplimiento de ambos aspectos.

El uso de sensores para la programación del riego ofrece la posibilidad de regar de acuerdo a las características individualizadas de cada invernadero (suelo, cultivo, tipo de plástico y diseño de estructura). Además, estos sensores permiten realizar un ajuste preciso del manejo del riego como por ejemplo la aplicación de un estrés controlado para mejorar la calidad, un control exacto del drenaje para el manejo de la salinidad y la identificación de un problema con el sistema de riego. Los sensores de humedad del suelo pueden emplearse como método único, o en combinación con el método del cálculo de las ne-

cesidades hídricas del cultivo a partir de datos climáticos, o incluso como un complemento a una estrategia del manejo del riego basada en la experiencia.

El objetivo de este artículo es describir los principales tipos sensores de medida del estado hídrico del suelo que se utilizan hoy día a nivel comercial y su uso para la programación del riego en cultivos de invernadero en condiciones mediterráneas. En la primera parte del documento se presentan aspectos de tipo práctico relacionados con el uso de los sensores, instalación en campo, tipo de datos que generan, interpretación de los datos, y uso de los datos obtenidos para definir el volumen y la frecuencia del riego. A continuación se describen los principales tipos de sensores usados a nivel comercial para el riego tanto en suelo como en sustratos. En la última parte se presentan algunos resultados de estudios experimentales con cultivos hortícolas en invernadero donde se comparó el manejo del riego con sensores frente al manejo convencional basado en la experiencia del agricultor o técnico.

2. Consideraciones técnicas relacionadas con el uso de sensores para el manejo del riego

Los sensores de suelo miden el potencial mátrico (tensiómetros, sondas de resistencia) o la humedad volumétrica del suelo (sondas de capacitancia o FDR, sondas TDR, sonda de neutrones). Hasta muy recientemente solo existían instrumentos para medidas puntuales en el tiempo como la sonda de neutrones o los tensiómetros, que requerían visitar la finca para realizar la medida. Los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de nuevos sensores y la posibilidad de recoger datos automáticamente de forma continua y automatizar el riego en base a las lecturas de los sensores.

2.1. Instalación de los sensores en el suelo o medio de cultivo

Normalmente los sensores de suelo se instalan para un periodo determinado de tiempo, por ejemplo, la duración de uno o varios ciclos de cultivo, por lo que se consideran entonces como instalaciones semipermanentes (Figura 1, izda.). Algunos sensores pueden introducirse brevemente en el suelo para tomar medidas individuales puntuales (Figura 1, dcha.). Hay sensores que se introducen en el suelo en tubos de acceso, que son tubos de PVC instalados previamente en el suelo y otros que se insertan directamente en el suelo o medio de cultivo. La correcta instalación en el suelo de los tubos de acceso y

de los sensores es esencial para la obtención de datos precisos y útiles. Es preciso que exista un contacto directo entre el suelo y el sensor o tubo de acceso; cualquier bolsa de aire puede ocasionar errores de medida importantes. Para ello se recomienda rellenar el orificio donde se va a instalar el sensor con suelo tamizado humedecido.

Figura 1. Instalación semipermanente de tensiómetros en un invernadero con suelo enarenado y cultivo de tomate (izda.) e instalación puntual de un sensor de capacitancia en planta ornamental (dcha.)

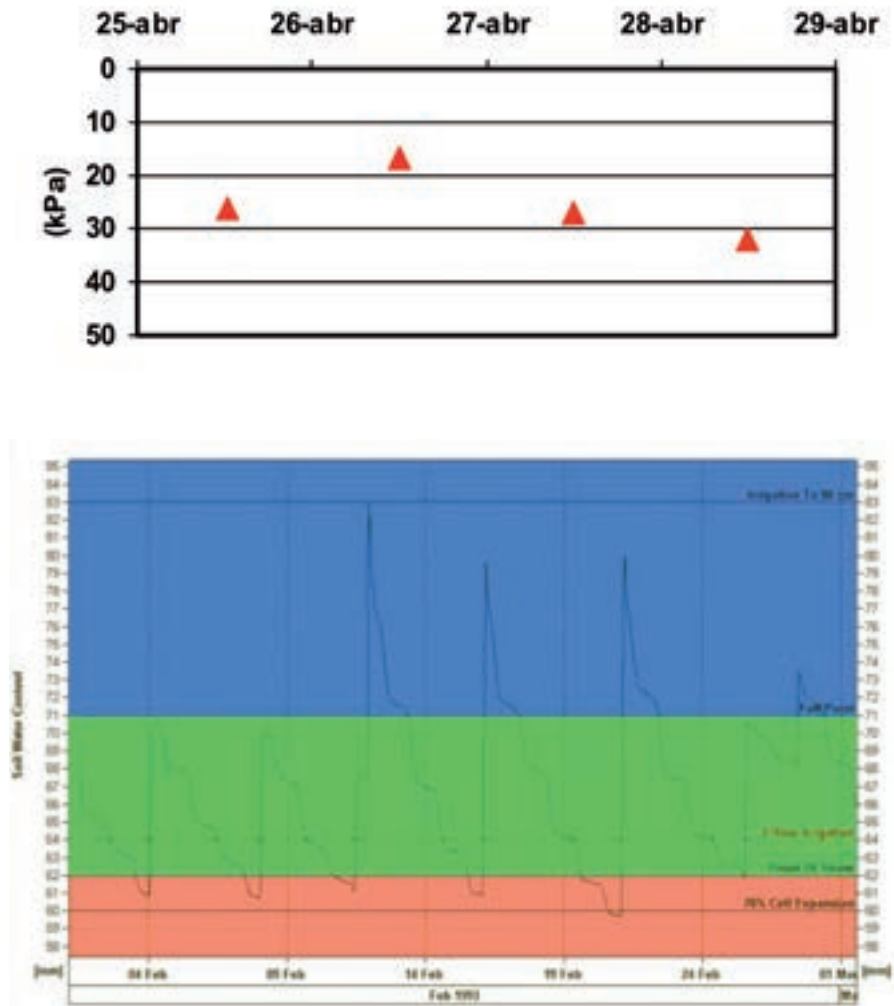


Fuente: elaboración propia y página web del fabricante.

2.2. Sistemas de registro y transferencia de datos

Todos los sensores de humedad de suelo disponibles pueden ser utilizados para realizar medidas instantáneas de humedad del suelo en un momento dado en el tiempo, lo cual requiere ir a la explotación (Gráfico 1, arriba) o pueden ser programados para la recogida automática de datos a pequeños intervalos de tiempo (normalmente entre 10 y 30 minutos) permitiendo una caracterización temporal y detallada de la dinámica del agua en el suelo (Gráfico 1, abajo). En el caso de registro manual, las medidas se deben realizar siempre a la misma hora del día y antes del riego. Algunos equipos disponen de un sistema de lectura manual que se acopla al sensor.

Gráfico 1. Comparación de datos de un tensiómetro registrados una vez al día (arriba) con datos de humedad volumétrica registrados de forma continua (cada 5 minutos) durante un ciclo de cultivo (abajo)



La recogida de datos en continuo se realiza con un sistema de almacenamiento de datos (*data logger*) y los datos pueden ser descargados o bien directamente en un ordenador portátil en la parcela o en un ordenador remoto usando tecnología de radio. Es posible también la descarga directa de datos a un ordenador en la explotación. La descarga remota de datos presenta la

ventaja de que no es necesario visitar la explotación para determinar las necesidades de riego. La monitorización continua de la humedad del suelo permite la disponibilidad de una historia detallada del riego aplicado y de la dinámica de humedad en el suelo y su extracción por el cultivo. Actualmente se ha desarrollado la tecnología de sensores sin cable lo cual facilita bastante su uso en campo solventando problemas de interferencia de los cables con el manejo del cultivo, daños de equipos y limitación espacial de instalación de sensores.

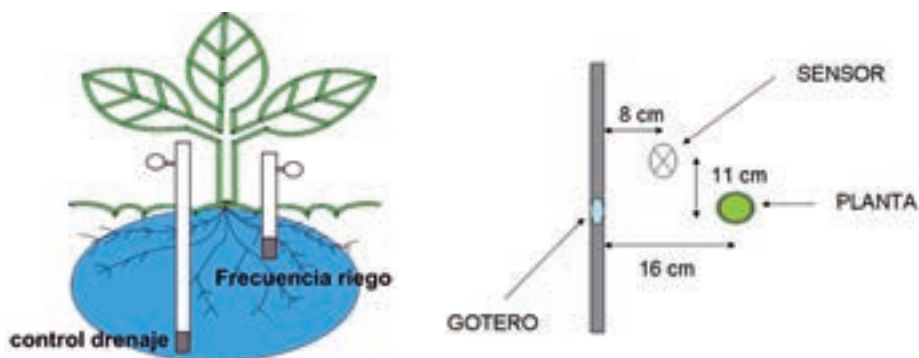
2.3. Configuración de los sensores en campo

Los sensores de medida de humedad solo miden pequeños volúmenes de suelo en relación al volumen total de la explotación. Cuando se utilizan sensores en cultivos de invernadero y riego por goteo hay que considerar que existe variabilidad espacial provocada por la heterogeneidad en la distribución del agua desde el emisor y variabilidad entre plantas provocada por la distribución de la radiación dentro del invernadero. Por ello es crítico que su instalación se realice en zonas representativas y que se disponga de varias repeticiones. Se deben evitar zonas no representativas como bordes, áreas con bajos niveles de radiación por sombras de estructuras, etc. Los sensores se deben instalar en el suelo bajo plantas sanas y representativas del cultivo. En invernaderos con una orientación Este-Oeste habría que disponer de dos repeticiones en los lados norte y sur del invernadero para tener en cuenta las diferencias en la distribución de luz, considerándose adecuado cuatro sensores/invernadero y un mínimo de dos o tres sensores/invernadero.

Hay sensores que miden la humedad del suelo a varias profundidades con un solo punto de instalación al disponer de sondas con varios sensores instalados verticalmente (ver Figura 4), mientras que otros solo miden la humedad en la profundidad donde se coloque el sensor, como por ejemplo los tensiómetros o las sondas ECH₂O (Figura 5). En cultivos de invernadero y riego por goteo se recomienda colocar los sensores en la zona con mayor concentración radicular, pero evitando la parte más húmeda del bulbo de riego. En la Figura 2 (derecha) se presenta una localización adecuada para el sensor en relación al gotero y a la planta. En el caso de sensores que solo miden a la profundidad de instalación, se recomienda instalar en cada zona de medida, un par de sensores según se indica en la Figura 2 (izquierda). El primer sensor se debe instalar a una profundidad de entre 10-20 cm en el suelo aportado, y nos indica el momento de iniciar el riego, cuando los valores de humedad

alcancen el límite inferior. El segundo sensor se instala a la misma distancia de la planta y gotero pero a una profundidad equivalente a la del sistema radicular. Este segundo sensor más profundo permite controlar que toda la zona radicular esté convenientemente humedecida y permite comprobar si el volumen de riego ha sido deficitario, adecuado o excedentario observando las tendencias en la humedad que registra este segundo sensor en el tiempo. Si no se dispone de dos sensores en cada zona de medida se puede trabajar con un solo sensor que será el sensor situado en la zona de mayor concentración de raíces. Hay sensores que miden solo en la profundidad donde se instalan y que no tienen un tubo vertical de acceso al suelo; en estos casos se realiza una instalación en las dos profundidades indicadas abriendo una trinchera según se muestra en la Figura 2. En el caso de sondas multisensores, solo se instala un tubo de acceso que se colocará a la misma distancia de la planta que se ha indicado anteriormente (Figura 2, dcha.).

Figura 2. Localización de sensores en un cultivo regado con goteo (izda.) y diagrama de la disposición de un sensor en relación a la planta y al gotero para un cultivo de invernadero (dcha.)



2.4. *Uso e interpretación de los datos obtenidos con sensores para el manejo del riego*

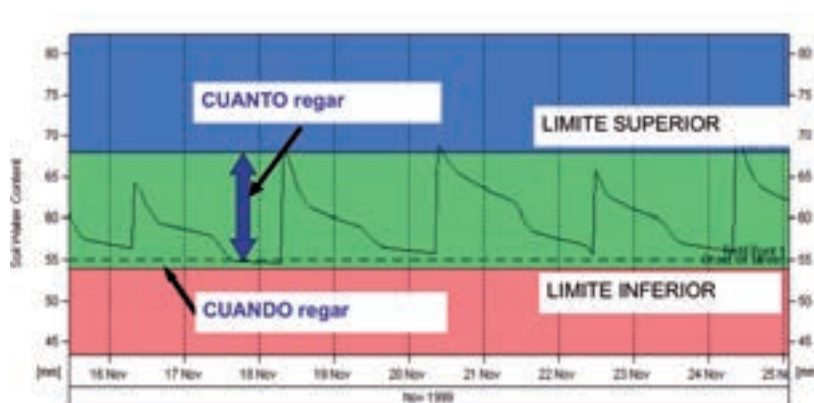
Los datos obtenidos con los sensores de suelo se pueden usar para la programación del riego de varias formas:

- i) Observando los datos que han sido obtenidos de forma manual o automáticamente y tras el análisis visual, tomar una decisión sobre el manejo del riego.
- ii) Conectando los datos que van siendo recogidos automáticamente a un controlador de riego que se pondrá en marcha cuando se alcancen niveles umbrales de humedad.

La puesta en marcha del controlador de riego se puede hacer directamente desde el *data logger* o con conexiones directas entre los sensores y el controlador.

Para poder usar los datos obtenidos con sensores de humedad en la programación del riego, es necesario establecer límites de humedad. Estos límites especifican tanto el rango de (i) contenidos volumétricos de agua, (ii) potenciales mátricos en el suelo o (iii) profundidad de la humedad en el suelo (expresada en mm) para una profundidad de enraizamiento específica que se considere adecuada para cumplir con los objetivos de manejo marcados para un cultivo concreto. La cantidad máxima permitida de humedad de suelo se denomina límite superior (Gráfico 2). Frecuentemente este valor es una aproximación a capacidad de campo en el punto o profundidad de suelo considerada. La cantidad mínima permitida de humedad de suelo se denomina límite inferior (Gráfico 2). Más habitualmente se define como la cantidad de humedad de suelo cercana y claramente superior a aquella en la cuándo el cultivo comienza a sufrir estrés hídrico. El límite inferior señala cuándo iniciar el riego, y el límite inferior cuando interrumpirlo; la distancia entre los dos límites indica la cantidad máxima que puede aportarse.

Gráfico 2. Ejemplo de manejo de la humedad del suelo entre límites superior e inferior y su uso para decidir el momento del riego y el volumen a aplicar



En sensores que miden el potencial mátrico del suelo, para establecer los límites superior e inferior de riego se utilizan las recomendaciones de los servicios de extensión o distribuidores. En el caso de sensores de humedad volumétrica no se pueden emplear valores generales y los límites han de definirse para cada localización, o por lo menos para cada tipo de suelo representativo. Se pueden, (i) establecer por medio de curvas características de humedad, definidas en el laboratorio, y usando valores de potencial mátrico recomendados para definir los límites superior e inferior, (ii) determinar en campo, capacidad de campo (como aproximación al límite superior), y el límite inferior por medio de la pérdida admisible de humedad o (iii) interpretación visual de datos, basada en evitar el drenaje y examinar las tasas diarias y volúmenes de agua extraída por el cultivo, por ejemplo, drenaje en profundidad, absorción hídrica reducida, movimiento horizontal del agua aportada (ver Gráfico 3, apartado 3.2). El análisis de los datos de humedad del suelo se facilita si se dispone también de datos climáticos como la temperatura el aire, humedad relativa y radiación solar. Hoy día existen distintos tipos de software disponibles comercialmente que ayudan a la interpretación de datos registrados con sensores, particularmente de medida de humedad volumétrica y permiten automatizar el riego en base a las lecturas de los sensores.

3. Descripción de los sensores de medida del estado hídrico del suelo y su uso en la programación del riego

A continuación se describen brevemente algunos de los equipos disponibles para realizar una programación del riego mediante la medida del potencial mátrico del agua o del contenido volumétrico de agua en el suelo. Se pondrá énfasis en los equipos que han sido evaluados y adaptados a las condiciones de invernadero.

3.1. Sensores de medida del potencial mátrico del medio de cultivo

Los tensiómetros miden de forma directa el potencial mátrico del agua en el suelo, o fuerza a la cual el agua está retenida en el suelo. Los valores de potencial mátrico tienen valores negativos aunque en algunas publicaciones de divulgación se presentan en valores positivos. A mayor valor absoluto más seco está el suelo. Los tensiómetros normalmente miden en un rango de 0 a -80 kPa y por ello son utilizados en sistemas de riego de alta frecuencia recomendándose valores de límite superior e inferior de -10 y -20 kPa, -10 y -30 kPa, y -15 y -40 kPa para suelos de textura gruesa, media y fina respectivamente. El tensiómetro consta de una cápsula cerámica porosa fijada a un tubo plástico transparente con el mismo diámetro exterior (normalmente aprox. 2,5 cm) con un depósito de agua en la parte superior del tubo y un vacuómetro también ajustado al extremo superior (Figura 3, izda.). El tensiómetro se llena de agua de tal manera que la columna de agua en su interior forma un continuo con el agua de la solución del suelo en el espacio circundante a través de la cápsula porosa. El potencial mátrico del suelo circundante ejerce una succión sobre el agua del tensiómetro, lo que se refleja en la lectura del vacuómetro. Los tensiómetros se fabrican en longitudes estándar, normalmente en longitudes múltiplo de 15 cm, por ejemplo, 15, 30, 45, 60, 90 y 120 cm.

Los tensiómetros son baratos, simples y fáciles de usar y fiables; sin embargo para que sean efectivos hay que invertir tiempo en su preparación y mantenimiento. Su rango de medida (hasta -80 kPa) tras el cual la columna de agua se rompe, puede ser una limitación para su uso en cultivos de melón o sandía en invernadero en mayo-junio cuando el suelo se puede secar rápidamente a consecuencia de episodios de alta demanda evaporativa. Aunque los tensiómetros más empleados son los manuales existen modelos eléctricos (más caros) que permiten medidas continuas y la puesta en marcha de forma auto-

mática del sistema de riego (Figura 3, centro). Los tensiómetros manuales son baratos pero tienen el inconveniente de que hay que tomar la lectura manualmente, al menos una vez al día. Hay modelos de tensiómetros que han sido adaptados para medios con poca retención de agua como la arena y algunos sustratos mediante el empleo de cápsulas cerámicas con poros más grandes que reducen el intervalo de funcionamiento (por ejemplo de 0 a -40 kPa), proporcionan tiempos de respuesta más rápidos, y una mayor precisión en suelos más húmedos.

Los sensores de resistencia (bloques de yeso o Watermark) son instrumentos simples y baratos que proporcionan una medida indirecta del potencial mátrico del suelo (Figura 3, dcha.). Su fundamento se basa en medir la resistencia eléctrica entre dos electrodos embutidos en un pequeño bloque de material poroso (yeso, arena, fibra de vidrio o conglomerado) enterrado en el suelo. Cuanto más bajo es el potencial mátrico del suelo, más alta es la resistencia entre los electrodos. La resistencia eléctrica se puede medir puntualmente con un medidor portátil (Figura 3, dcha.) o de forma continua con un *data logger* o en algunos casos se puede conectar directamente al controlador de riego. Los sensores de resistencia tienen un mayor tiempo de respuesta y tienen una menor exactitud en suelos húmedos que los tensiómetros.

Figura 3. Tensiómetro manual antes de su instalación (izda.), tensiómetro provisto de transductor de presión (centro) y sensor de matriz granular Watermark con la unidad de medida (dcha.)



3.2. Sensores de medida de la humedad volumétrica del medio de cultivo

La última generación de instrumentos de medida de humedad en suelo se basa en medir la constante dieléctrica del suelo la cual depende fundamentalmente de su contenido agua. Dentro de estas técnicas tenemos el sistema TDR (*Time Domain Reflectometry*) y el sistema FDR (*Frequency Domain Reflectometry*). El sistema TDR determina la velocidad de propagación de una onda electromagnética a través del plano que encierran dos o tres varillas de acero paralelas. El TDR permite medir un volumen de suelo considerable, no necesita calibración y permite medidas continuas de humedad. El nivel de precisión es elevado y generalmente también su precio. Las varillas pueden ser instaladas verticalmente pero para obtener valores de humedad a distintas profundidades se recomienda la inserción horizontal de las sondas. La mayor parte de sistemas TDR no utilizan tubos de acceso y las varillas de acero inoxidable se insertan directamente en el suelo. Existen versiones portátiles de los TDR con distinto nivel de complejidad que realizan medidas puntuales o sistemas fijos para monitorizar en continuo. El sensor TDR, Netasense de Netafilm, Israel (Figura 6 c) ha sido desarrollado para aplicaciones comerciales de bajo precio de medida de humedad del suelo y automatización del riego en base a las lecturas del sensor, utilizando la tecnología inalámbrica de radio para transmitir los datos al ordenador de riego. Este sensor permite utilizar el *software* 'Irriwise Manager' de Netafilm para monitorizar clima, suelo y planta y automatizar el riego.

Las sondas FDR o de capacitancia han sido utilizados a nivel comercial para la programación de riego de muchos cultivos tanto herbáceos como leñosos. La ventaja de estos equipos es permitir la caracterización de la dinámica del agua en el suelo y la extracción de agua por el cultivo a distintas profundidades haciendo posible un control del drenaje en profundidad. El sistema FDR mide cambios en la capacitancia del suelo en respuesta a un campo eléctrico, los cuales dependen del contenido de humedad del suelo. Uno de los equipos FDR mas usado a nivel comercial y mundial es el EnviroScan, (Sentek Technologies, Australia) que está compuesto por varias sondas conectadas por cable (hay actualmente una versión sin cable que transmite la señal mediante ondas de radio) a un *data logger* donde se almacenan las lecturas. Cada sonda está compuesta por varios sensores colocados a distintas profundidades dentro de un tubo de PVC (5,5 cm diámetro) (Figura 4, izda.) con lo cual se pueden realizar medidas continuas del contenido de agua en el suelo a las distintas profundidades donde están colocados los sensores (Figura 4).

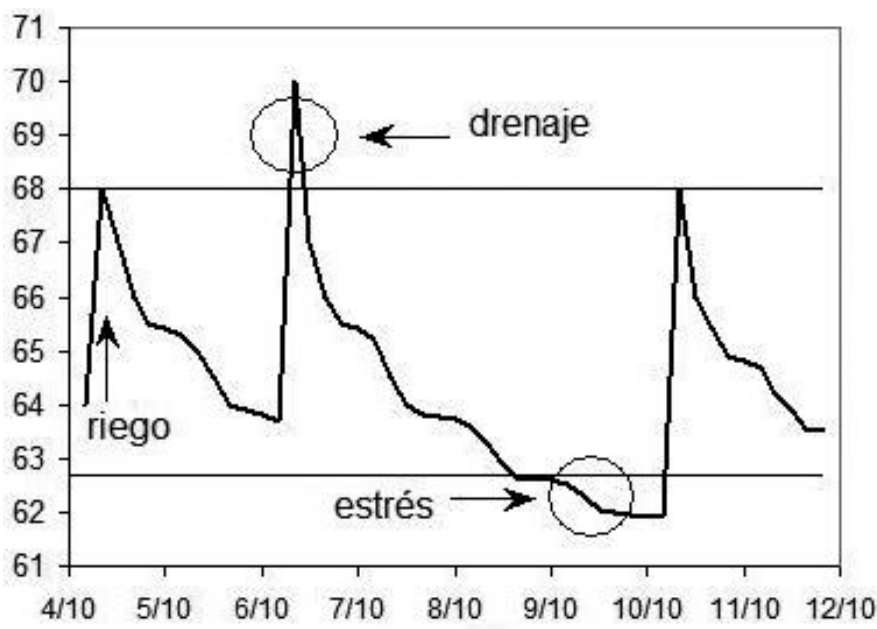
Figura 4. Equipo FDR de capacitancia EnviroScan antes (izquierda) y después de su instalación en el invernadero. En la fotografía de la izquierda se muestran los 4 sensores insertados en una sonda vertical



Cada sensor integra un volumen de suelo correspondiente a un cilindro de 10 cm en altura y 3 cm de distancia desde el borde del tubo. El sistema dispone de un software que proporciona gráficos donde se registra la evolución del contenido de agua en el suelo entre dos límites, permitiendo tomar la decisión de cuándo regar y cuánta agua aplicar. El Gráfico 3 muestra cómo evoluciona el contenido de agua en los 20 cm superficiales de suelo durante varios ciclos de riego. El límite superior es fijado para evitar drenaje (Gráfico 3) y por tanto lavado de fertilizantes, y el límite inferior representaría el punto a partir del cual el cultivo sufre estrés hídrico. Este método de programación de riego se basa en el análisis de tendencias más que de valores absolutos de humedad volumétrica.

La medida de la humedad volumétrica en el suelo con sondas FDR puede verse afectada por los cambios en la salinidad del suelo, de modo que al aumentar la salinidad se produce una sobrestimación de la humedad volumétrica. La sensibilidad a la salinidad es una limitación importante cuando usamos este tipo de sensores de capacitancia en situaciones donde se producen cambios considerables en la salinidad del suelo como en cultivos de melón o ciertas variedades de tomate en los que la salinidad se aumenta como parte del manejo para aumentar la calidad del fruto, y en suelos salinos.

Gráfico 3. Evolución del contenido de agua del suelo durante la aplicación de varios ciclos de riego. En mm



* Las líneas horizontales corresponden al límite superior e inferior de humedad.

** Los datos se tomaron con un equipo EnviroScan en un invernadero con cultivo de tomate.

El EasyAG (*Sentek Technologies*) es una adaptación del EnviroSCAN diseñado para cultivos hortícolas con una instalación simplificada (Figura 6 b). Como el EnviroSCAN el EasyAG tiene varios sensores a distintas profundidades en una sonda, pero tiene la gran ventaja que las sondas son bastante más estrechas, de 2,7 cm de diámetro en comparación de 5,1 cm del EnviroSCAN convencional (con el tubo de acceso hay 0,4 cm más de diámetro). La instalación del tubo de acceso de PVC se hace fácilmente con una barrena de 3,1 cm de diámetro que se empuja en el suelo hasta la profundidad deseada.

Hay otras adaptaciones del EnviroSCAN como el TriSCAN que permite medir tanto la humedad volumétrica del suelo como la salinidad y la temperatura, y el Diviner 2000 (Figura 6) que es un sensor de instalación no permanente que registra medidas puntuales de humedad a varias profundidades realizadas de forma manual. El *software* IrriMAX (Sentek Technologies) permite la interpretación de datos registrados con los diferentes sistemas de sensores de Sentek Technologies y la automatización del riego.

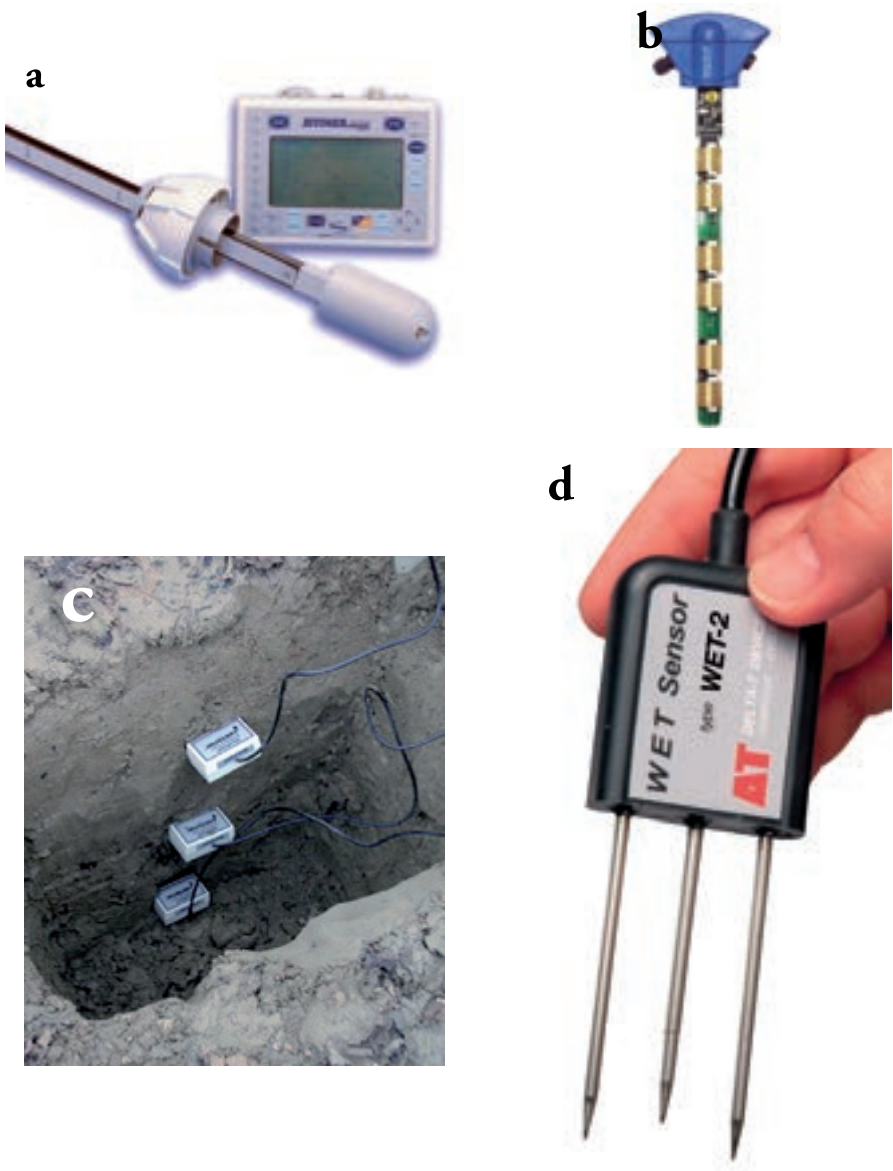
Hay otros sensores FDR de bajo coste y complejidad como las sondas ECH₂O de Decagon Devices (Figura 5), que se emplean tanto en cultivos en suelo como en sustratos para medir la humedad del suelo. Según el fabricante, estas sondas no son sensibles a la conductividad eléctrica (CE) del suelo. Hay varios modelos que miden o la humedad volumétrica (EC5, 10HS) o que miden simultáneamente humedad volumétrica, la CE y la temperatura del suelo (sonda 5TE). Esta última es adecuada para conocer estos tres parámetros en sustratos como perlita o lana de roca. En el Gráfico 4 se presenta un ejemplo de datos de humedad, conductividad eléctrica y temperatura medidos con una sonda ECH₂O en fibra de coco. Si se desea calcular la humedad a distintas profundidades de suelo habrá que realizar la instalación horizontal de los sensores en cada horizonte según se aprecia en la Figura 5. Desde estas sondas es posible realizar la observación y registro de datos de forma manual o de forma continua y se puede enviar la salida al controlador de riego. El sensor WET-2 (Delta-T Devices) (Figura 6 d) mide también contenido de humedad, CE y temperatura, y tiene bastantes aplicaciones en el manejo del fertirriego en horticultura tanto en suelo como en sustrato. Este instrumento, al igual que algunas de las sondas ECH₂O, puede ayudar al manejo de salinidad y los nutrientes, al medir la CE del medio de cultivo. Este sensor se comercializa con un lector manual, aunque también permite registrar datos en un *logger*. El Hydra Probe II sensor (Steven Water Inc.), que es un sensor FDR robusto y de bajo coste, que además permite medir la humedad del suelo, la temperatura y la conductividad eléctrica, así como hacer lecturas manuales o continuas.

Figura 5. Sondas ECH₂O Instaladas a tres profundidades de suelo para medir humedad volumétrica, temperatura de suelo y conductividad eléctrica en distintos medios de cultivo



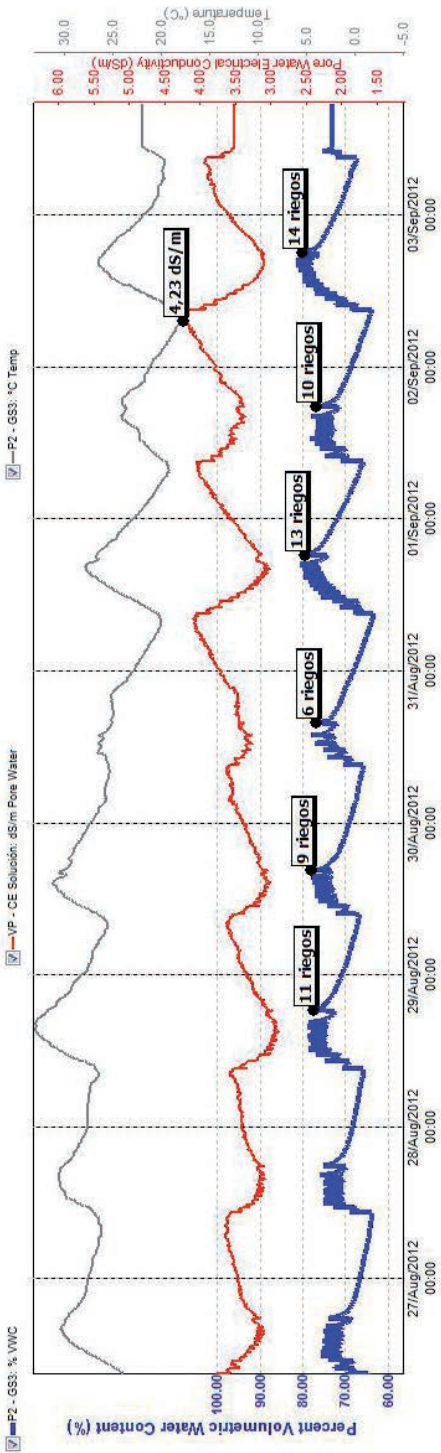
Fuente: Decagon Devices y Lab-Ferrer.

Figura 6. Sonda Diviner con equipo de registro de datos (a), sonda EasyAG (b), sondas TDR Netasense (c) y WET sensor (d)



Fuente: página web de los fabricantes de los equipos.

Gráfico 4. Evolución a lo largo del tiempo de valores de humedad volumétrica (líneas azules), conductividad eléctrica del medio (líneas rojas) y temperatura (líneas negras) medidas con una sonda ECH₂O en un sustrato de fibra de coco



Fuente: Lab-Ferrer.

4. Uso de sensores para el control del riego en sustratos

En el caso de cultivos en sustrato, la automatización del riego con sensores (en sentido general) está mucho más desarrollada y establecida a nivel comercial que en cultivos en suelo, usándose en el sureste peninsular de forma mayoritaria para el control del riego en sustratos los sensores de nivel. En el caso de usar sensores de medida de estado hídrico en sustrato será imprescindible que haya un registro continuo cara a la automatización; además puesto que los nutrientes se aplican en fertirriego donde los nutrientes suponen un aumento de la salinidad, solo se pueden emplear sensores cuyo comportamiento no se vea afectado por cambios en la salinidad del medio. Para que las lecturas sean fiables es crítico que haya un buen contacto sensor-sustrato lo cual es una consideración importante en medios muy porosos como perlita.

Normalmente en invernaderos comerciales, los cultivos en sustrato se riegan con volúmenes fijos, y los sensores se usan para determinar la frecuencia del riego; cuando el sensor detecta que se ha alcanzado el límite inferior de humedad (o el mayor valor de tensión deseable), se abre la válvula y se pone en marcha el riego; la válvula se cierra tras un tiempo especificado para alcanzar un volumen de riego y drenaje dado. El programador de riego suele incluir rutinas como la máxima y mínima duración de riego permitida, y el máximo o mínimo periodo de tiempo entre riegos.

Los sensores se deben colocar en el sustrato en una zona representativa del sistema radicular (Figura 7). Para determinar la profundidad de instalación del sensor en sustrato hay que tener en cuenta que existe un gradiente de humedad en altura. Por ello los valores absolutos y los límites de humedad deseables dependerán de la profundidad de instalación. Lo ideal es que el sensor en lugar de ser puntual, permita lecturas de humedad integradas de toda la altura del contenedor. Debido al relativamente pequeño volumen de medida por estos sensores, es recomendable instalar varios sensores en el invernadero para asegurar que las medidas son representativas del cultivo. Al igual que se ha comentado para suelo, los sensores se instalan cerca de plantas sanas y en zonas representativas alejadas de los bordes.

En el caso de tensiómetros habría que usar tensiómetros eléctricos de alta resolución. Estos tensiómetros son adaptaciones de los de suelo para medir en un rango muy estrecho de potencial (0-10 kPa) con respuestas muy rápidas. Aunque los valores umbrales de potencial que ponen en marcha o detienen de forma automática el riego dependen del tipo de sustrato, época del año y objetivos perseguidos con el riego, se han propuesto límites inferiores

y superiores de tensión de -5 y -1 kPa adecuados para distintos sustratos. Sin embargo en algunos sustratos susceptibles a la saturación este límite superior no es el ideal y en otros sustratos, el límite inferior de -5 kPa puede limitar para el flujo de agua; por ejemplo en lana de roca se recomienda utilizar un límite inferior de -1,5 kPa.

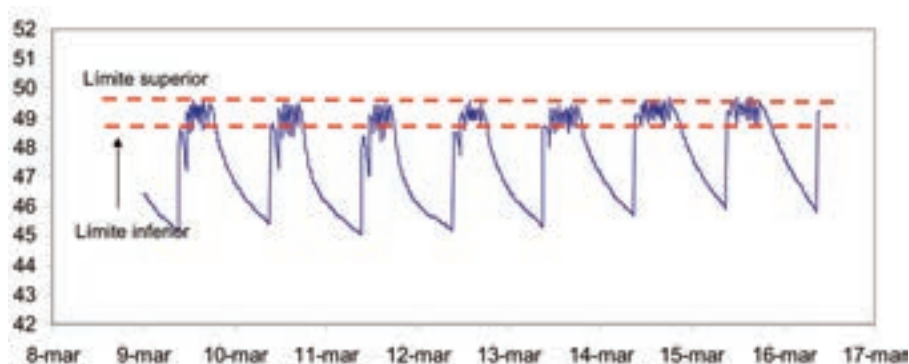
Los sensores que más se utilizan para el control del riego en sustratos son los tipo FDR como el Theta Probe® (Delta-T Devices, Reino Unido), las sondas ECH₂O, el sensor Grodan WCM-control (Grodan, Holanda) y el WET-2 sensor (Delta-T Devices UK). El Theta Probe® se ha utilizado como herramienta de diagnóstico para caracterizar la dinámica del agua en el sustrato en combinación con sensores de medida del estado hídrico de la planta y climáticos (Phytech, Ltd. Israel); sin embargo no hay información sobre su uso para automatizar el riego. El sensor Grodan WCM-control, desarrollado específicamente para lana de roca, permite medir el contenido volumétrico de agua, la CE y la temperatura del sustrato de forma manual o continua y se puede usar para automatizar el riego (Figura 7, derecha). Al igual que en suelo, el uso de sensores de humedad volumétrica para el control del riego requiere la determinación de los límites superior e inferior de humedad que varían con el tipo y edad del sustrato, el cultivo y su estado de desarrollo y el clima (Gráfico 5). El sensor Grodan WCM-control, se comercializa con recomendaciones de valores umbrales de riego según la especie y época del año.

Figura 7. Instalación de una sonda GS3 en un sustrato de fibra de coco y sonda Grodan WCM sensor de medida de humedad, temperatura y conductividad eléctrica diseñado para lana de roca



Fuente: página web del fabricante.

Gráfico 5. Evolución a lo largo del tiempo de la humedad volumétrica para un sustrato. Se señalan los límites superior e inferior de humedad deseables. En porcentaje

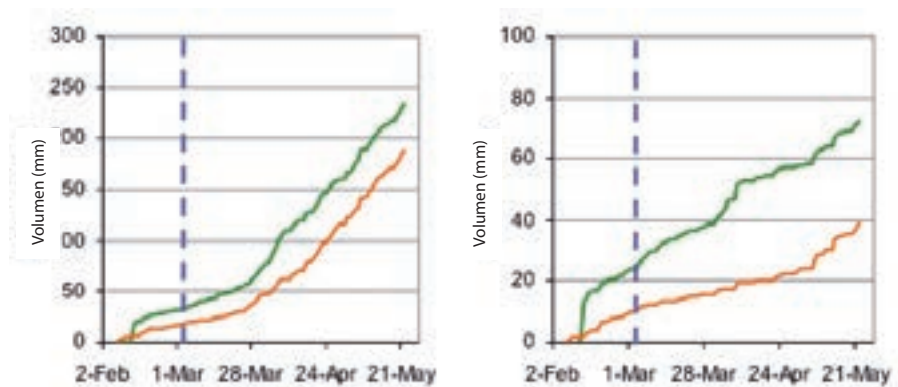


5. Resultados de ensayos experimentales de comparación de manejo del riego

En los distintos ensayos experimentales realizados en los que se ha comparado el uso de agua y la producción entre un cultivo de invernadero regado según la experiencia del agricultor/técnico y usando sensores se ha puesto de manifiesto que el uso de sensores para el manejo del riego conlleva un ahorro de agua al disminuir considerablemente las pérdidas por drenaje mientras que se mantiene la producción.

Granados (2011) en un cultivo de melón demostró que el empleo de tensiómetros para programar el riego manualmente, el ahorro en el volumen de agua de riego aportado fue de un 20 %, siendo este volumen de 235 mm en un tratamiento regado según las prácticas de la zona y de 189 mm cuando se usaron tensiómetros (Gráfico 6, izda.). Esto supuso una reducción considerable del drenaje que fue de 73 mm en el manejo convencional y de 31 mm en el manejo con tensiómetros y, por tanto, se redujo un 47% en el tratamiento regado con sensores (Gráfico 6, dcha.). En este trabajo no hubo diferencias significativas en la producción total y comercial entre tratamientos (Tabla 1).

Gráfico 6. Comparación entre dos tratamientos de manejo de riego del volumen de riego aplicado a lo largo del ciclo (izda.) y del volumen de drenaje recogido (dcha.). Los tratamientos fueron CM (verde), manejo del riego según la experiencia del agricultor y INM- manejo del riego usando tensiómetros (naranja)



Fuente: Granados (2011).

Tabla 1. Volúmenes de riego aplicados y producción de un cultivo de melón en invernadero bajo dos sistemas de manejo del riego

Tratamiento	Riego aplicado (mm)	Producción (kg m ⁻²)
Riego convencional	235	7,8
Riego mediante tensiómetros	189	7,5

Fuente: Granados (2011).

En otro estudio se comparó el manejo del riego en un cultivo de melón en invernadero usando sondas FDR (EnviroScan) con un manejo del riego basado en la experiencia. En comparación con el tratamiento bajo riego basado en la experiencia, en el tratamiento donde el riego se programó con el sistema FDR hubo una reducción en el drenaje vertical de agua y el estado hídrico del suelo fue más constante durante el ciclo de cultivo, no existiendo diferencias en producción entre tratamientos.

Según los resultados de estos estudios, la programación de riegos mediante la monitorización continua del contenido de agua del suelo con sondas FDR permite caracterizar la dinámica del agua del suelo en la zona radicular a tiempo real, lo cual elimina todas las incertidumbres asociadas a la gestión del riego basada solo en la experiencia. El sistema FDR parece ser un

buen método de gestión del riego cuando es prioritario minimizar el gasto de agua y reducir el drenaje de agua y nutrientes en profundidad. Sin embargo, su elevado coste y la necesidad de personal técnico cualificado para su instalación y para ayudar inicialmente con la interpretación de datos puede suponer una restricción importante a la hora de ser adoptado en invernaderos del suroeste peninsular. Quizá su uso podría estar justificado en cultivos de elevada sensibilidad a exceso o falta de agua como el pimiento o en suelos difíciles de regar. Para cultivos menos sensibles, desarrollados en suelos de elevada capacidad de retención de agua, puede ser difícil justificar una inversión de este tipo por los agricultores. La gestión del riego basada en tensiómetros parece ser un método bastante adecuado en invernaderos. Sin embargo la elevada necesidad de un continuo y cuidadoso mantenimiento, así como el tiempo necesario para la toma de los registros diarios durante la utilización de tensiómetros manuales, podrían plantear limitaciones para su adopción por parte de los agricultores y técnicos.

6. Aspectos generales sobre el uso de sensores para la programación de riegos

Existen una serie de cuestiones de tipo operativo que han de ser consideradas por los usuarios en caso de que se utilicen sensores en explotaciones comerciales. Con sensores simples, como son los tensiómetros manuales, estas cuestiones tendrán una importancia relativa; con sistemas más sofisticados estas cuestiones serán esenciales para realizar un uso efectivo del sistema. Estas cuestiones incluyen:

- Formación en el uso, instalación y mantenimiento del sistema de sensores.
- Asesoramiento para la interpretación de datos, y uso y mantenimiento del equipo.
- Cuestiones relacionadas con el *software*, idioma, facilidad de uso.
- Interferencia entre sensores y cables y operaciones de cultivo.

Finalmente se presenta un tabla resumen con las características más relevantes de los principales sensores presentados en este artículo (Tabla 2).

Tabla 2. Resumen de las principales características de algunos sensores de medida del estado hídrico del suelo

Tensiómetro (varios fabricantes)		Watermark (Irrometer)	Diviner-2000 (Sentek)	EasyAG (Sentek)	Sondas ECH ₂ O (Decagon)
Información	Potencial mátrico (succión)	Potencial mátrico (succión)	Cantidad de agua en el suelo	Cantidad de agua en el suelo	Cantidad de agua en el suelo
Puntos fuertes	• Simplicidad. • Medida directa. • Mide parámetro directamente relacionado con la absorción de agua por los cultivos. • Se puede automatizar. • Precio.	• Ídem al tensiómetro pero mide un mayor rango de potencial mátrico. • Precio.	• Sonda móvil. • Precio. • Software intuitivo interpretación de datos.	• Medias continuas. • Instalación simplificada. • Software intuitivo, interpretación de datos.	• Simplicidad. • Precio. • Versatilidad: lecturas manuales. • Continuas.
Puntos débiles	• Requiere preparación y mantenimiento periódico. • Rango de medida reducido (no es adecuado en suelos secos o riegos poco frecuentes). • En invernadero puede dar problemas en días calurosos.	• Medida no directa. • Menor precisión. • Mal comportamiento en suelos muy húmedos o que se secan muy rápidamente.	• Posible sensibilidad a la salinidad. • Requiere medidas manuales.	• Posible sensibilidad a cambios de salinidad.	• Instalación, requiere excavar suelo.

Referencias bibliográficas

Granados, M. R. (2011): «Nitrate leaching from soil-grown vegetable crops under greenhouse conditions in Almería: Magnitude, determining factors and development of an improved management system»; *Tesis Doctoral*. Almería, Universidad de Almería.

Automatización del riego en suelo: ejemplo práctico

Evaluación de sensores para su uso en la automatización

María Dolores Fernández Fernández
Estación Experimental Cajamar

1. Introducción

La escasez de recursos hídricos unido a una creciente contaminación por nitratos (Directiva de Nitratos) en los acuíferos de las zonas de producción en invernadero en el sureste peninsular hace necesario un uso más eficiente del fertirriego y en particular en el manejo del nitrógeno. Además, la pérdida de rentabilidad de las explotaciones por un incremento de los costes (algunos fertilizantes han incrementado un 25 %) y las exigencias de los mercados por una horticultura más respetuosa con el medio ambiente hace que el sector esté mostrando interés porque el fertirriego se realice en base a criterios técnicos.

La implantación creciente de programadores de riego en las explotaciones proporciona la capacidad para que el manejo del fertirriego se haga de manera más eficiente mediante el uso de sensores. Anteriormente, se han evaluado sensores de suelo (tensiómetros, watermark, EnviroScan) (Thompson *et al.*, 2006; Thompson *et al.*, 2007a) y de planta (dendrómetros) (Gallardo *et al.*, 2006) para su uso en la programación de riegos en cultivos hortícolas en invernadero. Sin embargo, alguno de ellos no son fáciles de manejar (dendrómetros) o se ven afectados por salinidad (EnviroScan). Los avances que se han producido en los últimos años en el desarrollo de nuevos sensores proporcionan un amplio abanico de sensores para el manejo del riego.

Este artículo recoge los trabajos realizados en automatización del riego con tensiómetros, además de la evaluación de otros sensores, que fueron seleccionados teniendo en cuenta criterios relativos a la precisión en las medidas y robustez, que fuesen sencillos de instalar y de manejo, bajo precio y que puedan utilizarse en la automatización del riego.

2. Ensayo automatización del riego

La provincia de Almería alberga una importante superficie de invernaderos, que ha permitido el desarrollo económico y un uso más eficiente de los recursos, como la tierra y el agua, este último es un recurso escaso en toda la zona. Conscientes de la importancia que tiene el agua en la sostenibilidad de la horticultura en invernadero en el sureste peninsular, se ha trabajado desde distintas instituciones por mejorar el uso del agua de riego y reducir los problemas medioambientales relacionados con el mismo.

La eficiencia del riego depende de la programación, que es el procedimiento usado para calcular la cantidad de agua de riego a aplicar, intentando cubrir las necesidades hídricas del cultivo y reducir al mínimo las pérdidas por drenaje a capas de suelo más profundas. La programación del riego se puede realizar a partir de medidas del contenido de agua en el suelo, medidas del estado hídrico de la planta o a partir de datos climáticos.

El consumo de agua de un cultivo se puede estimar a partir de datos climáticos medidos en la zona y es el método de programación de riegos más ampliamente usado a nivel mundial. En cultivos hortícolas bajo invernadero en el sureste peninsular es posible estimar con precisión la dosis de riego a partir de datos de radiación solar medida en exterior y temperatura máxima y mínima medida dentro de invernadero (Fernández *et al.*, 2009). En base a estos trabajos se desarrolló un software, *PrHo v 2.0* (© 2008 Fundación Cajamar; Fernández *et al.*, 2008) y se han elaborado recomendaciones de riego basadas en datos climáticos medios (<http://www.publicacionescajamar.es/series-tematicas/centros-experimentales-las-palmerillas/dosis-de-riego-para-los-cultivos-hortícolas-bajo-invernadero-en-almeria/>), con el objetivo de proporcionar a técnicos y agricultores herramientas que les permita optimizar los aportes de riego a los cultivos hortícolas bajo invernadero, y que además sean de fácil uso.

Los sensores que miden el estado hídrico del suelo y de la planta pueden usarse como base para el manejo del riego o para complementar otros métodos. Estos sensores permiten adaptar el manejo del riego a las características particulares de cada cultivo/finca. Hasta finales de los 80, la mayor parte de estos sensores requerían medidas manuales y su uso en invernaderos comerciales era muy limitado. El desarrollo tecnológico reciente ha permitido disponer de una nueva generación de sensores con nuevas prestaciones. Actualmente

la información sobre el estado hídrico del suelo y la planta puede ser enviada directamente a un ordenador personal, teléfonos móviles o programadores de riego y activar el riego.

El manejo del riego en base a medidas directas del estado hídrico del cultivo, tales como dendrómetros, flujo de savia, temperatura del cultivo, etc., están aún en desarrollo e investigación y no existen muchas aplicaciones comerciales en horticultura debido a su elevado precio, mantenimiento y complejidad técnica para el manejo del riego.

En general, los sensores de suelo son más fáciles de usar para el manejo del riego que los de planta y el avance en el desarrollo de protocolos de riego ha sido mayor. El manejo del riego con sensores se basa en mantener la humedad del suelo entre dos límites, uno inferior que indica los valores más secos del suelo cuando se debe iniciar el riego para evitar que el cultivo sufra estrés hídrico y un límite superior que indica los valores más húmedos que se permiten para que el drenaje sea mínimo.

Las medidas de la humedad del suelo realizadas con un sensor pueden ser integradas en los programadores de riego y automatizar el riego. Comercialmente existen programadores automáticos del riego que regulan la humedad del suelo en base a medidas proporcionadas por sensores. El sistema más simple de programador de riego consiste en aplicar el riego cuando se detecta que las medidas realizadas por los sensores están por debajo de un límite y aplican la dosis de riego introducida por el usuario. Un sistema más complejo sería aquel en el cual el riego se activa cuando detecta que la humedad del suelo medida con los sensores está por debajo de un límite y detiene el riego cuando la humedad supera el límite superior. Este tipo de programadores requieren que se equipen con sensores precisos, que se realicen medidas de humedad continuas a intervalos de tiempo pequeños, que no se vean afectados por salinidad y que sean robustos. Por ejemplo, los electrotensiómetros están equipados con un transductor de presión (Figura 1) que convierte la lectura en una señal eléctrica y permiten el registro en continuo del potencial matricial del suelo (Gráfico 1). Para un correcto funcionamiento del programador de riego es importante que periódicamente se compruebe el funcionamiento del transductor de presión ya que es bastante sensible a golpes. Un transductor en buen estado debe mostrar una relación lineal entre la señal eléctrica y el potencial matricial, si no es así es una indicación de algún fallo (Gráfico 2).

Figura 1. Electrotensiómetro equipado con un transductor de presión que permite la medida del potencial matricial en continuo



Gráfico 1. Evolución del potencial matricial medido con electrotensiómetros y lectura manual del vacuómetro (1kPa=1cbar). En kPa

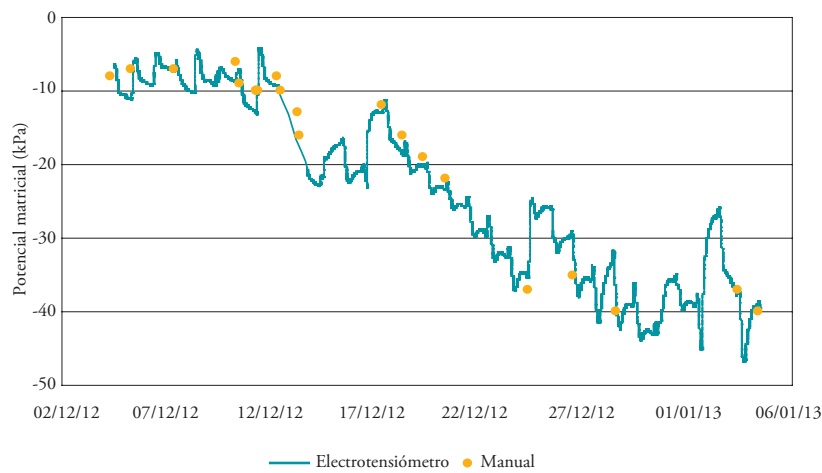
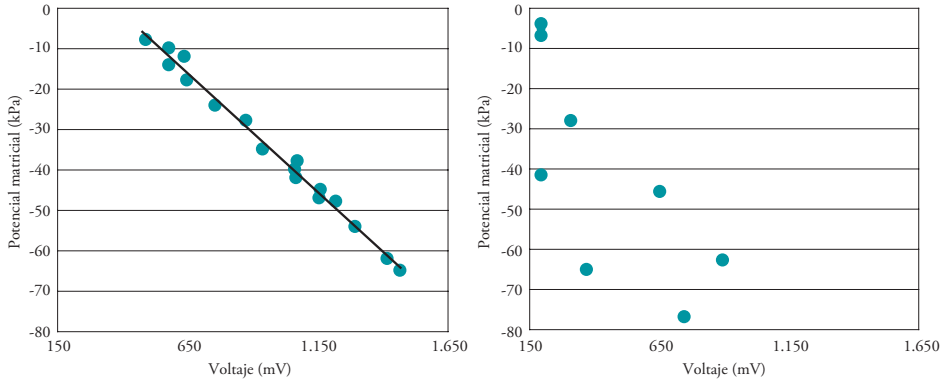


Gráfico 2. Relación entre la señal eléctrica (Voltaje, mV) y el potencial matricial (Kpa) registrado por un electrotensiómetro con un transductor de presión en buen y mal estado (A y B, respectivamente). 1kPa = 1cbar



3. Ensayo de automatización del riego en un cultivo de pepino

En los últimos años han aparecido numerosos sensores, con distinto grado de complejidad, precio y que permiten medidas en continuo. En los cultivos en invernadero y suelo enarenado en el sureste peninsular se han evaluado algunos de estos equipos (Thompson *et al.*, 2006; Thompson *et al.*, 2007a) sin mostrar una ventaja clara en precisión respecto a los tensiómetros. Los tensiómetros son instrumentos utilizados para registrar el potencial matricial del agua en el suelo, proporcionando información de cuál es el grado de limitación que la planta encuentra para extraer agua.

En base a estos trabajos previos (Thompson *et al.*, 2006; Thompson *et al.*, 2007a), se decidió plantear el ensayo de automatización del riego utilizando tensiómetros, ya que son simples, baratos y fiables, no están afectados por la salinidad del suelo y su rango de trabajo normalmente no es una limitación en los suelos generalmente húmedos de este tipo de cultivos.

El sistema de automatización utilizado fue mediante tensiómetros equipados con un relé-selector (Figura 2). En este caso, el usuario selecciona un valor de potencial al cual quiere que el programador inicie el riego con la dosis preestablecida. El programador aplicará riegos hasta que la aguja este por debajo de la lectura seleccionada. Este sistema es menos sofisticado que otros pero más robusto.

Figura 2. Tensiómetro equipado con un relé-selector que posibilita la activación del riego

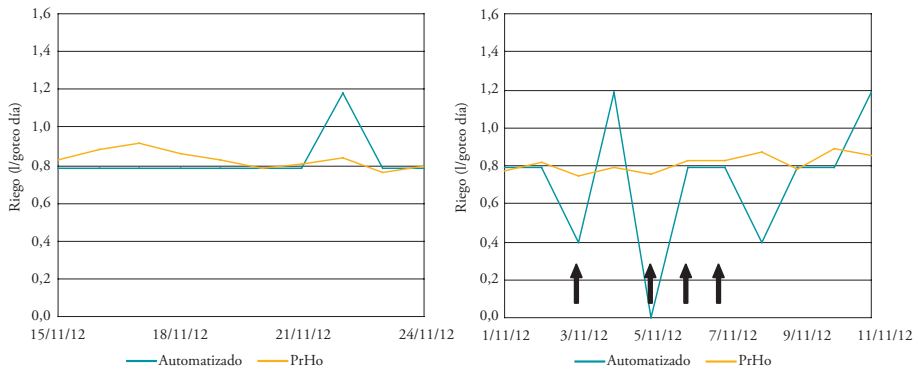


El ensayo de automatización del riego se llevó a cabo en un invernadero de la Estación Experimental Cajamar en Almería con un cultivo de pepino (cultivar Caronte) trasplantando el 27/09/2012 y finalización el 17/01/2013. El cultivo, a una densidad de $1,33 \text{ plantas m}^{-2}$, se regó con goteros interlinea de $2 \text{ litros hora}^{-1}$, con una separación entre ellos de $0,5 \text{ m}$ y $1,5 \text{ m}$ entre ramales. La automatización del riego se inició el 23/10/2012 y el riego se activó cuando el potencial matricial alcanzaba 20 cbar , aplicándose un riego de 10 minutos de duración ($0,33 \text{ litros gotero}^{-1}$ ó $0,44 \text{ litros m}^{-2}$). Se instalaron cuatro tensiómetros con relé-selector en distintas parcelas del invernadero. Los relés de los tensiómetros se conectaron a un logo, que fue programado para cuando al menos la aguja de dos tensiómetros estaba por encima de la lectura seleccionada (20 cbar) activase la demanda del programador de riego y se aplicara un riego. Como sistema de seguridad se utilizó la pausa entre demandas (pausa entre demandas: 1 hora) y el periodo de riegos (de $8:00$ a $17:00$), esto evitó tener que hacer modificaciones en el programador.

El manejo automatizado del riego se comparó con un manejo en función de la estimación de las necesidades de riego del cultivo a partir de datos climáticos medios con PrHo (©2008 Fundación Cajamar; Fernández *et al.*, 2008). La frecuencia de riego se estableció cuando el potencial matricial medido con tensiómetros manuales era de $25\text{-}30 \text{ cbar}$.

El volumen de riego aplicado entre el 23/10/2012 y 16/01/2013 fue muy similar en el manejo con PrHo y con automatización, 75 y 68 litros m^{-2} , respectivamente. Diariamente, los aportes de riego también fueron similares, excepto en periodos muy nublados o con lluvia (Gráfico 3).

Gráfico 3. Evolución del volumen del riego diario aplicado en el manejo automatizados y con PrHo en dos periodos diferentes. Las flechas indican la ocurrencia de lluvia.
En litros/gotero día



La automatización del riego en base a tensiómetros con relé-selector se adapta a las necesidades del cultivo, es precisa, sencilla y barata. Sin embargo, requiere de un seguimiento diario de los tensiómetros para detectar si se han descargado o la aparición de burbujas. También es recomendable instalar más de un tensiómetro por invernadero y utilizar medidas de seguridad en los programadores de riego ante fallos de funcionamiento de los sensores. Cuando se quiera mantener el suelo muy húmedo aplicando riegos muy cortos y frecuentes es conveniente utilizar tensiómetros más precisos, que cuentan con una cápsula cerámica diferente y cuyo rango de trabajo es de 0-30 cbar.

La programación del riego usando el potencial mátrico del suelo es fácil de implantar (Hanson *et al.*, 2000), y los valores umbrales para los cultivos de pimiento, melón y tomate han sido determinados para algunos cultivos bajo invernadero en el sudeste español (Thompson *et al.*, 2007b). Estos umbrales fueron determinados a partir de la reducción del potencial hídrico de plantas sometidas a estrés hídrico frente a plantas bien regadas. Los valores umbrales de potencial mátrico fueron -58 kPa (1 kPa=1 cbar) para pimiento, -35 kPa para melón, y -38 kPa y -58 kPa para tomate con alta y baja demanda evaporativa, respectivamente. En experiencias llevadas a cabo en suelo enarenado

han puesto de manifiesto que mantener valores de potencial muy bajos, entorno a -10 kPa, no son recomendables porque se pueden producir mermas de producción que pueden ser debidos a problemas de anoxia radicular (González, 2003). El drenaje puede minimizarse manteniendo valores de potencial matricial inferiores a -30 kPa a 25-30 cm de profundidad (González, 2003).

4. Evaluación de sensores para la automatización del riego

En el mercado existen una gran diversidad de sensores de suelo que difieren en precio, precisión, facilidad de uso, preparación, mantenimiento, necesidad de apoyo técnico, facilidad en la interpretación de datos, disponibilidad de protocolos de riego, idioma de trabajo y disponibilidad de un software amigable en equipos que requieren el uso de un ordenador (Thompson *et al.*, 2003).

Los tensiómetros equipados con relé-selector o con transductores de presión son sensores precisos para su uso en automatización del riego, sin embargo tienen el inconveniente de necesitar un mantenimiento periódico para evitar la formación de burbujas o la descarga del agua. Por ello, se han evaluado otros sensores para su utilización en la automatización del riego en cultivos hortícolas, ECH₂O 5TE y MPS2 (Decagon Devices Inc., USA) (Figura 3). Estos sensores fueron seleccionados teniendo en cuenta las necesidades de mantenimiento, robustez, sencillez de manejo y precio. La evaluación realizada a los sensores ECH₂O 5TE y MPS2 tenían como objetivos:

- Comparar la sensibilidad y rapidez de respuesta de los sensores para detectar estrés hídrico en el cultivo.
- Determinar el valor umbral (humedad o potencial) para cada sensor que indique el inicio de estrés hídrico en el cultivo. Este valor es el límite inferior de humedad del suelo que indicaría el inicio del riego con un manejo automatizado.

El sensor ECH₂O 5TE (Figura 3) mide la humedad, temperatura y conductividad eléctrica del suelo. Es un sensor capacitivo del tipo *Frequency Domain Reflectometry* (FDR, Reflectometría en el dominio de la frecuencia) que usa un campo electromagnético para medir la constante dieléctrica o permitividad del suelo, a partir de la cual se determina el contenido de humedad. La conductividad eléctrica (CE) se determina a partir de la medida de la resistencia entre dos electrodos al paso de una corriente eléctrica alterna. La CE se cal-

cula multiplicando la inversa de la resistencia (conductancia) por la constante de celda (que es la relación entre la distancia entre los electrodos y su área). El sensor 5TE utiliza un termistor de superficie para medir la temperatura. En la instalación del sensor es importante que este quede completamente enterrado en el medio de cultivo porque las medidas de humedad se pueden ver afectas fuertemente, así como asegurarse un buen contacto entre el suelo y las varillas.

Figura 3. Sensores ECH₂O 5TE (izda.) y MPS2 (dcha.)



Fuente: Decagon Devices Inc. (EEUU).

La posibilidad de medir humedad y CE con un mismo sensor hace interesante al sensor 5TE para su uso en el manejo del riego y fertilización. En el mercado existen otros sensores que miden humedad y CE del medio de cultivo, tales como WET (Delta T Devices Ltd) y GS3 (Decagon Devices, Inc.). El GS3 está indicado para su uso en sustratos. Los sensores 5TE y WET pueden usarse en suelo o sustrato, siendo el precio del 5TE inferior debido a un diseño más simple.

El MPS2 (Figura 3) es un sensor que mide el potencial matricial (Ψ_m) y la temperatura del suelo. El equipo mide la constante o permitividad dieléctrica de una matriz sólida compuesta de dos discos de cerámicas, y esta depende de la cantidad de agua presente en los espacios porosos de la cerámica. El drenaje de la cerámica en un amplio rango de potencial es un punto importante en el diseño del sensor. El potencial hídrico al cual el poro drena (el potencial de

entrada de aire) depende del tamaño del poro y una cerámica ideal debería tener poros que oscilaran desde muy pequeños a muy grandes. La cerámica del MPS2 fue diseñada para aproximarse al ideal, sin embargo tiene un volumen de poros grandes que drenan a potenciales hídricos más húmedos. Esto limita el rango de medida entre -5 kPa (el potencial de entrada del aire en los poros más grandes de la cerámica) y -500 kPa.

El MPS2 utiliza un termistor de superficie para medir la temperatura y está situado justo debajo del molde de plástico, por ello es importante que el equipo esté perfectamente enterrado para que el sol no incida directamente.

La evaluación de los sensores se realizó aplicando un ciclo de desecación (desde el 9/1/2013 hasta el 24/1/2013) durante el cual las plantas no recibieron aplicaciones de riego. Entre ciclos de desecación las plantas se regaron hasta saturación con la misma solución nutritiva que el resto del invernadero para mantener unas condiciones estables de CE en el suelo.

Los sensores se instalaron en tres líneas de cultivo de pepino (descrito anteriormente) a la misma profundidad (15 cm sin considerar la capa de arena) y distancia del gotero y planta (5 cm). En cada una de estas tres líneas se instaló un tensiómetro y un MPS2, cada uno a un lado de la planta, en otra planta se instalaron dos varillas TDR de 15 cm de longitud y sensores 5TE, uno a cada lado de la planta. Además, se instaló un tensiómetro a 25 cm de profundidad sin considerar la capa de arena, y una sonda de succión a 15 cm de profundidad.

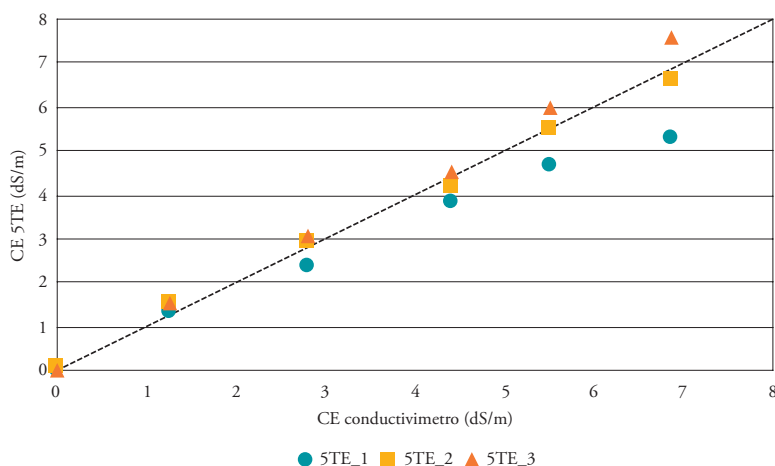
Todos los sensores fueron instalados el 29/11/2012 y las plantas durante el ciclo de cultivo fueron regadas cuando los valores de los tensiómetros eran inferiores a -20 cbar con una dosis equivalente a las necesidades hídricas del cultivo estimadas con PrHo (© 2008 Fundación Cajamar).

5. Evaluación sensor ECH₂O 5TE

En primer lugar, se evaluó la precisión del sensor 5TE en la medida de la conductividad eléctrica (CE). Previamente a la instalación en suelo, se comparó la CE medida con conductímetro frente a la medida con los sensores 5TE (Gráfico 4) cuando se sumergieron completamente en agua destilada a la que se le fue añadiendo KCl (Kizito *et al.*, 2008) para aumentar la CE del agua desde 0 hasta 6,9 dS m⁻¹. Para valores inferiores a 4,5 dS m⁻¹ del agua, los

tres sensores midieron con precisión la CE. Para valores de CE superiores los sensores mostraron diferencias entre sí y menor precisión.

Gráfico 4. Conductividad eléctrica (CE) medida con conductímetro y con sensores 5TE en agua destilada a la que se añadió KCl para incrementar la CE. En dS/m



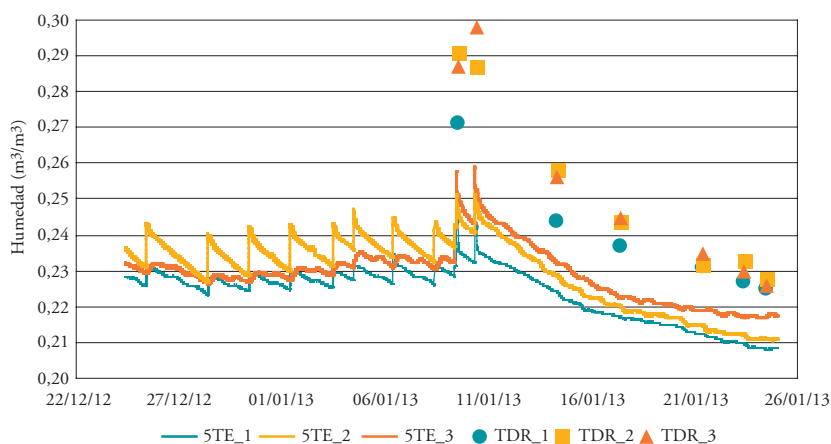
Las sondas 5TE miden la conductividad eléctrica del suelo, que puede ser transformada en CE de la solución del suelo. La CE de la solución del suelo, calculada a partir de la CE del suelo medida con el sensor 5TE se comparó con la CE de la solución del suelo extraída con sondas de succión (Tabla 1). Dos sensores 5TE (5TE_1 y 5TE_3) proporcionaron valores de CE de la solución de suelo similares a los medidos con las sondas de succión, teniendo en cuenta que estaban instalados en goteros diferentes. Sin embargo, el sensor 5TE_2 mostró valores significativamente más elevados que las sondas de succión. Dada la variabilidad en la medida de la CE entre sensores 5TE se recomienda usar la evolución o tendencia de los valores de CE en vez de los valores absolutos para el manejo de la fertilización.

Tabla 1. Conductividad eléctrica de la solución del suelo (CE, dS m⁻¹) medida con tres sensores 5TE y con tres sondas de succión (SS)

Fecha	5TE_1	SS_1	5TE_2	SS_2	5TE_3	SS_3
10/10/12	6,27	4,69	7,63	5,31	4,68	4,9
11/01/13	4,71	4,55	9,39	4,25	4,25	3,42

Finalmente, la precisión en la medida de la humedad del suelo de los sensores 5TE se determinó comparando con las medidas realizadas con un equipo TDR en el mismo bulbo húmedo (Gráfico 5). Este equipo (TDR) fue evaluado en suelo enarenado y en un rango de humedad amplio con una precisión alta (Fernández *et al.*, 2004). En general, antes de iniciar los ciclos de desecación cuando se aplicaron frecuencias y dosis de riego normales en el cultivo de pepino, todos los equipos 5TE presentaron aumentos bruscos de humedad durante el riego (aporte de agua) y descensos progresivos entre riegos (consumo de agua), aunque hubo diferencias entre los equipos 5TE en como registraron estos procesos (Gráfico 5). Posteriormente, durante el ciclo de desecación todos los equipos 5TE presentaron un descenso progresivo de la humedad que fue suavizándose con el tiempo. En general, los valores de CVA medidos con los equipos 5TE fueron claramente inferiores a las medidas del TDR (Gráfico 5).

Gráfico 5. Evolución de la humedad del suelo medida con sensores 5TE y TDR durante un ciclo de desecación. En m^3/m^3

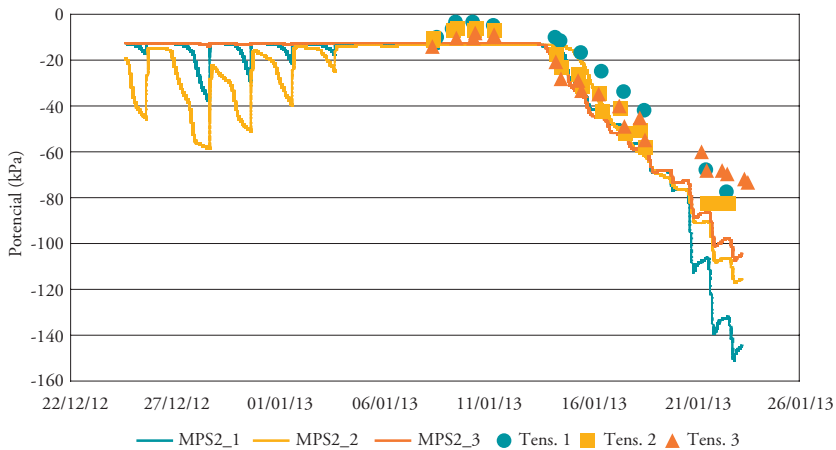


6. Evaluación sensor MPS2

El Gráfico 6 muestra la dinámica temporal del potencial matricial del suelo (Ψ_m) medido con tres equipos MPS2 junto con las medidas puntuales (diarias) realizadas con tensiómetros localizados en el mismo bulbo húmedo durante un ciclo de desecación. Antes de iniciar el ciclo de desecación, cuando

el cultivo se regaba siguiendo las prácticas normales en la zona, los equipos MPS2 presentaron distintos comportamientos: algunos de ellos (MPS2_3) no presentaron variaciones de Ψ_m durante los riegos manteniendo valores prácticamente constantes entre -12 y -13 kPa (Gráfico 6), mientras que otros equipos si mostraron las variaciones típicas de respuesta a un riego (aumentando drásticamente durante la aplicación y descendiendo progresivamente durante el periodo entre riegos). Estos datos parecen indicar que este equipo no fue sensible a valores de Ψ_m mayores de -12-13 kPa (Gráfico 6), cuando el suelo presenta altos contenidos de humedad, por lo que su uso para mantener condiciones de alta disponibilidad de agua en el suelo parece discutible. Posteriormente, durante el ciclo de desecación todos los equipos MPS2 presentaron reducciones progresivas de los valores de Ψ_m con el tiempo y, en general, los valores medidos por los equipos MPS2 fueron claramente inferiores (más negativos) que las medidas de los tensiómetros localizados en los mismos bulbos húmedos (Gráfico 6).

Gráfico 6. Evolución de la humedad del suelo medida con sensores MPS2 y tensiómetro durante un ciclo de desecación. En kPa (1kPa = 1 cbar)



7. Establecimiento de límites de humedad o potencial para el uso de los sensores 5TE y MPS2 en la automatización del riego en cultivos hortícolas en invernadero y suelo enarenado

La automatización del riego en base a sensores de suelo tiene su fundamento en mantener el nivel de humedad entre dos umbrales o límites, capacidad de campo y el nivel de agotamiento permisible, para que no se produzca drenaje por exceso de agua o estrés hídrico en el cultivo. El volumen de agua a aplicar viene determinado por la diferencia entre estos dos límites.

La aparición de estrés hídrico en el cultivo de pepino se determinó comparando el potencial hídrico en hoja (Ψ_{hoja}) y tallo (Ψ_{tallo}) de plantas bien regadas frente a plantas sometidas a desecación. Para el cultivo del pepino, en nuestro trabajo el cultivo presentó estrés cuando el Ψ_m del suelo medido con tensiómetros era inferior a -50 kPa (50 cbar). En general, para suelos de textura franca se considera que capacidad de campo se corresponde con valores de Ψ_m del suelo de -33 kPa (33 cbar) (Ritchie *et al.*, 1999).

Para un cultivo de pepino en invernadero y suelo enarenado de textura franca, podemos considerar que el valor de humedad correspondiente a capacidad de campo del sensor 5TE está en torno a $0,222 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (límite superior) y que el límite inferior corresponde con una humedad inferior a $0,22 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, valor para el cual el cultivo de pepino mostró estrés hídrico. Para el sensor MPS2, estos límites se corresponderían con valores entorno a -40 kPa y -65 kPa, respectivamente. Tanto para el sensor 5TE como para el MPS2 estos límites corresponden a los valores aplicando la calibración de ambos sensores proporcionada por el fabricante. En el caso de desarrollar una calibración específica para las condiciones particulares de cultivo con el fin de mejorar la precisión (ambos sensores infraestiman ampliamente el estado hídrico del suelo), estos límites deberán ser recalculados a partir de la ecuación de calibración.

Referencias bibliográficas

FERNÁNDEZ, M. D.; BONACHELA, S.; CONTRERAS, A. y GONZÁLEZ, A. M. (2004): «Evaluación de un equipo de medida continua de humedad basado en la reflectometría en el dominio de frecuencias en un suelo enarenado»; *Sinopsis trabajos* (61-64). Logroño, XXII Congreso Nacional de Riegos.

- FERNÁNDEZ, M. D.; CÉSPEDES, A. y GONZÁLEZ A. M. (2008): «PrHo V. 2.0: Programa de Riego para cultivos Hortícolas en invernadero»; *Documento Técnico* (01). Almería, Fundación Cajamar.
- FERNÁNDEZ, M. D.; BAEZA, E.; CÉSPEDES, A.; PÉREZ-PARRA, J. y GÁZQUEZ, J. C. (2009): «Validation of On-Farm Crop Water Requirements (PrHo) Model for Horticultural Crops in an Unheated Plastic Greenhouse»; *Acta Horticulturae (ISHS)* (807); pp. 265-270.
- GALLARDO, M.; THOMPSON, R. B.; VALDEZ, L. C. y FERNÁNDEZ, M. D. (2006): «Use of stem diameter variations to detect plant water stress in tomato»; *Irrigation Science* (24); pp. 241-255.
- GONZÁLEZ, A. M. (2003): «Programas de riego para cultivos hortícolas en invernaderos enarenados en Almería»; *Tesis doctoral*. Almería, Universidad de Almería.
- HANSON, B. R.; ORLOFF, S. y PETERS, D. (2000): «Effectiveness of tensiometers and electrical resistance sensor varies with soil conditions»; *California Agriculture* (54); pp. 47-50.
- KIZITO, F.; CAMPBELL, C. S.; CAMPBELL, G. S.; COBOS, D. R.; TEARE, B. L.; CARTER, B. y HOPMANS, J. W. (2008): «Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor»; *Journal of Hydrology* (352); pp. 367-378.
- RITCHIE, J. T.; GERAKIS, A. y SULEIMAN, A. (1999): «Simple model to estimate field soil water limits»; *Transactions of the ASAE* (42); pp. 1609-1614.
- THOMPSON, R. B. y GALLARDO, M. (2003): «Programación de riegos mediante sensores de humedad en suelo»; en FERNÁNDEZ, M. *et al.*, eds.: *Mejora de la eficiencia en el uso del agua en cultivos protegidos*. Dirección General de Investigación y Formación Agraria de la Junta de Andalucía; pp. 375-402.
- THOMPSON, R. B.; GALLARDO, M.; AGÜERA, T.; VALDEZ, L. C. y FERNÁNDEZ M.D. (2006): «Evaluation of the Watermark sensor for use with drip irrigated vegetable crops»; *Irrigation Science* (24); pp. 185-202.
- THOMPSON, R. B.; GALLARDO, M.; FERNÁNDEZ, M. D.; VALDEZ, L. C. y MARTÍNEZ-GAITAN, C. (2007^a): «Salinity effects on soil moisture measurement made with a capacitance sensor»; *Soil Science Society of America Journal* (71); pp. 1647-1657.

THOMPSON, R. B.; GALLARDO, M.; VALDEZ, L. C. y FERNÁNDEZ M. D. (2007b): «Using plant water status to define soil water thresholds for irrigation management of vegetable crops using soil moisture sensors»; *Agricultural Water Management* 88(1-3); pp. 147-158.

Uso de sondas de succión para el manejo del fertirriego en horticultura intensiva

María Teresa Lao Arenas
Universidad de Almería

1. Concepto de nutrición de las plantas. Un marco donde situarnos

Me gustaría iniciar este artículo revisando el concepto integral de nutrición. Podemos decir que nutrición es el proceso a través del cual, a partir del conjunto de elementos que toma del ambiente, la planta, desarrolla su metabolismo biosintético y energético, determinado genéticamente, para llevar a cabo el crecimiento.

Existen 4 elementos fundamentales para la vida:

- La energía que las plantas toman de la radiación solar en forma de fotones.
- El carbono que lo toman en forma de anhídrido carbónico (CO_2) atmosférico y con el que la planta sintetiza estructuras carbonadas como los azúcares.
- El agua que es el aceptor final de electrones en la fotosíntesis.
- Los elementos minerales: que son absorbidos en forma de iones o moléculas simples.

Según esta definición los elementos nutricionales son la luz, el anhídrido carbónico, el agua y los elementos minerales, sin embargo, en un sentido clásico, el concepto de nutrición se restringía a la aplicación de agua y elementos minerales, ya que en un sistema de cultivo tradicional, son los únicos que permitían un control por parte del agricultor. En la actualidad, trabajando en invernadero, se pueden establecer técnicas tanto para el control de la luz (coeficientes de transmisión de cubiertas, calidad de luz que llega al cultivo, así

como el empleo de mallas de sombreo y blanqueo), como en el control de la concentración del anhídrido carbónico del ambiente (aportación carbónica y ventilación), el control hídrico del cultivo (riego y mantenimiento de valores de humedad del ambiente en unos rangos determinados mediante nebulización y ventilación) y aportación de elementos nutritivos.

Aunque en este artículo nos vamos a centrar en la fertirrigación, no debemos perder de vista que debemos optimizar todo el sistema de producción, para conseguir los resultados esperados.

2. Fertirrigación. Criterios de aplicación

Se denomina fertirrigación, a la aplicación conjunta de agua y fertilizantes. Me gustaría remarcar que el sistema de fertirrigación es, hoy por hoy, el método más racional para realizar una fertilización optimizada respetando el medio ambiente. El uso de esta técnica mediante riego localizado supone una reducción en la cantidad de fertilizantes aplicados, en torno al 25-50 %, cuando se compara con la fertilización convencional, sin afectar negativamente a los rendimientos, además presenta un menor consumo de agua, que se cifra entre un 33 y un 50 %. Este sistema permite una mayor y más constante concentración de los nutrientes en la zona de la raíz y una disminución de sus pérdidas por lixiviación.

Para satisfacer las necesidades del cultivo, mediante la técnica del fertirriego, se pueden seguir dos criterios:

- A) Uno más tradicional de adaptar el suministro de nutrientes, en sentido cuantitativo, a las necesidades teóricas del cultivo en cada momento, lo que requiere utilizar los elementos de diagnóstico normales.
- B) Y otro empleado en hidroponía, más fisiológico y de sentido más cualitativo, que trata de aportar al cultivo una disolución fisiológica, equilibrada iónicamente, de modo que contenga todos los elementos nutritivos que necesita el cultivo. En cuanto a la programación del fertirriego en sistemas localizados de alta frecuencia, se diferencia respecto a otros sistemas tradicionales ya que el papel de suelo como almacén de agua y nutrientes, es marginal, siendo clave la evaluación precisa del consumo de agua y nutrientes por el cultivo, para mantener los niveles adecuados. En la Figura 1 podemos ver un esquema de ambos sistemas.

Figura 1. Sistema tradicional que adapta el suministro de nutrientes a las necesidades teóricas del cultivo. Sistema fisiológico que aporta al cultivo una disolución fisiológica, equilibrada iónicamente, de modo que contenga todos los elementos nutritivos que necesita el cultivo



3. Sondas de succión. ¿Qué nos pueden aportar?

Atendiendo a las bases expuestas y evaluando nuestro sistema productivo, podemos decir que disponemos actualmente de la tecnología adecuada para controlar con gran precisión las características de la disolución nutritiva mediante nuestros equipos de fertirriego. En la Figura 2 se puede ver un cabezal de fertirriego, que mediante un programa de ordenador nos permite aplicar la disolución nutritiva requerida.

A partir de una calidad concreta de agua de riego se aportan los nutrientes necesarios para obtener una disolución ideal. Su control se realiza mediante la toma de muestras en el emisor, donde podemos medir la conductividad eléctrica y el pH mediante sensores y realizar análisis de elementos nutritivos.

Sin embargo, hay que tener en cuenta las interacciones de esta disolución nutritiva con el suelo, con la disolución de suelo preexistente, con la planta y

el ambiente, que conlleva profundas modificaciones respecto a la disolución nutritiva aportada. Por lo tanto, es la disolución del suelo, la que está bañando las raíces de la planta y de donde toma el agua y los nutrientes, y es la que debemos optimizar.

Figura 2. Cabezal de fertirriego de gran precisión



Podemos concluir que es importante controlar la disolución nutritiva aplicada, pero es fundamental conocer la disolución real que está a disposición de la planta, que es lo que denominamos disolución del suelo. Sin embargo, el productor no suele controlarla puesto que no es de fácil acceso, como lo es la disolución nutritiva.

Para poder obtener la disolución del suelo de forma rápida y continuada a lo largo del cultivo, propongo el uso de sondas de succión, que es el único mecanismo dinámico, a nivel de explotación comercial, que permite obtener la disolución del suelo, y una vez conocida su composición y las necesidades de la planta, nos permite aplicar la disolución nutritiva con el objetivo de optimizar la disolución de suelo y por consiguiente optimizar los nutrientes disponibles para la planta.

Me gustaría remarcar que el objetivo del fertirriego no es aplicar al suelo una disolución nutritiva ideal, sino aplicar una disolución nutritiva que dé lugar a tener una disolución del suelo ideal.

La sonda de succión es el único método viable para extraer *in situ* la disolución del suelo de forma natural, es decir, sin proceder a diluciones de la misma.

Tradicionalmente en nuestros cultivos, el control de la disolución del suelo se llevaba a cabo mediante el extracto saturado, que en el mejor de los casos, se realizaba al inicio del cultivo, y posteriormente, si surgían problemas.

Como alternativa a este tipo de gestión, y para paliar estos problemas, se propone el uso de sondas de succión para la obtención de la disolución del suelo. Que nos permite tener en todo momento, con gran facilidad y ahorro de tiempo, una estimación adecuada de la conductividad eléctrica y pH de dicha disolución del suelo, y cuando se considere oportuno, un análisis detallado de los nutrientes que contenga.

El interés de las sondas de succión se justifica por los siguientes motivos:

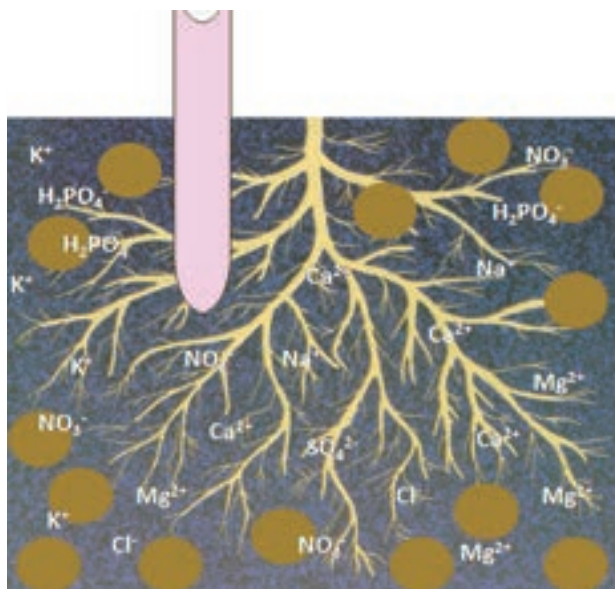
- 1) Se está trabajando en cultivos muy rentables, pero de corta duración y con fluctuaciones climáticas importantes a lo largo del cultivo, que modifican tanto las necesidades del mismo, como el estado nutricional de la disolución del suelo, por ello precisamos de un método, que permita obtener información periódica antes de que tenga consecuencias sobre la producción, pudiendo realizar varios muestreos sin dañar el suelo, para hacer las correcciones necesarias del fertirriego.
- 2) Otro factor importante es el coste de los análisis, que en el caso de muestras obtenidas con sondas de succión es inferior a los análisis de extracto saturado, ya que evita los trabajos previos a las determinaciones analíticas.
- 3) Se pretende poner esta herramienta a disposición del agricultor, y por consiguiente, debe ser de fácil manejo, resistente a las condiciones climáticas y debe ser robusta para evitar su rotura en las distintas operaciones culturales que se realizan en el invernadero, así como ser un muestreador eficaz, es decir, que el porcentaje de fallos en la obtención de muestra sean bajos.
- 4) Nuestro sistema productivo es muy heterogéneo. Cada invernadero presenta cultivos, variedades y fechas de plantación distintas. Las aportaciones de estiércol difieren en cantidad y año de aplicación en los distintos suelos, incluso algunos productores no realizan aportaciones de estiércol. Los plásticos empleados en la cubierta difieren en vejez y calidad. Esta heterogeneidad nos obliga a llevar una gestión

individualizada de cada invernadero, lo que se puede llamar «una gestión a la carta» para optimizar la producción. Por lo tanto el establecimiento de normas generales de manejo se desaconsejan en este sistema productivo.

4. Definición de sonda para materiales y métodos de AP

Los primeros en introducir la técnica de la sonda de succión, fueron Briggs y McCall en 1904, proponiendo su utilización como una raíz artificial, que succiona la disolución del suelo realmente disponible para las plantas (Figura 3).

Figura 3. Las sondas de succión nos permiten conocer la composición del suelo y, en función de esta información, diseñar la solución nutritiva, que de forma eficiente puede ser aplicada a los cultivos mediante el equipamiento de fertirrigación



Este método de extracción, se basa en la conexión de la fase acuosa del suelo, con otra fase acuosa a la que se le aplica vacío. El mecanismo para mantener esta diferencia de presión, se realiza a través de una pared porosa saturada de agua, similar a la que conocemos de los tensiómetros.

La sonda de succión, consiste en un elemento poroso de forma y tamaño variable, a través del cual, penetra la disolución del suelo, al aplicar un vacío al sistema. La forma usual de este elemento puede ser semiesférica. El elemento poroso, va unido a un cilindro de PVC o metálico, de diámetro ligeramente superior y de longitud variable dependiendo de la profundidad que se quiera muestrear.

El cilindro de PVC, se conecta a una cámara de vacío (Figura 4). En el modelo 1 se encuentra la cámara de vacío acoplada a dicho cilindro y a continuación encontramos una válvula de gases, que permite mantener el nivel de vacío en el interior de la sonda. En el modelo 2 el cilindro se encuentra sellado por un tapón de goma, al que atraviesa un tubo de pequeño diámetro y paredes semirrígidas que conecta con una botella que constituye la cámara de vacío.

Figura 4. Modelos de sondas de succión y su equipamiento

Modelo 1



Modelo 2



El equipo también consta de una bomba manual de vacío, con la que realizamos la succión. Debe llevar un vacuómetro insertado sobre un cono de reducción roscado que permite medir el nivel de succión que estamos aplicando al generar vacío en la sonda (lo que denominamos coloquialmente «cargar la sonda»).

Si utilizamos el modelo 1 además necesitamos una jeringa de 50 ml, provista de un microtubo para extraer la muestra. Si utilizamos el modelo 2 la muestra se recoge en la botella y sencillamente abrimos la válvula y volcando la botella obtenemos la muestra.

5. Manejo de las sondas de succión

En este apartado vamos a exponer toda la información relativa al manejo de las sondas en nuestros invernaderos, desde la limpieza y comprobación del estado de las sondas antes de su instalación en campo. Vamos a contestar a todas esas preguntas que nos están surgiendo: ¿dónde colocar las sondas y cuantas debemos colocar? ¿Cómo se instalan? ¿Cómo se lleva a cabo la toma de muestras? Y ¿qué debemos hacer con las muestras?

5.1. Limpieza de las sondas de succión antes de su instalación en campo

Para evitar la contaminación de muestras con elementos residuales del proceso de fabricación de sondas o su uso en una campaña anterior de cultivo, es importante la preparación previa de la sonda antes de muestrear, para ello se suele tratar con ácido diluido.

El procedimiento de limpieza consiste en poner en un recipiente la disolución de ácido diluido (HCl 1N o HNO_3), sumergir las cerámicas de las sondas y practicarles a el vacío, de tal forma que forcemos al ácido a atravesar los poros de la cerámica y por lo tanto limpie el interior de sus poros, que de otro modo serian inaccesibles. Pasadas 24 horas se vacía el contenido y se lavan bajo el grifo con abundante agua para eliminar los restos superficiales de ácido, y tras este lavado se deben de colocar de nuevo las sondas en el recipiente, pero en este caso con agua y se le practica nuevamente vacío, al objeto de arrastrar los restos de ácido que queden en el interior de los poros, se dejan unas 24 horas, se descargan, se vacían y se vuelven a lavar bajo el grifo con abundante agua.

5.2. Comprobación del estado de las sondas antes de su instalación en campo

Otra consideración importante es que debemos cerciorarnos que estén en perfecto estado, es decir, que la sonda mantenga el vacío adecuadamente y sea capaz de obtener muestra. Para ello situaremos la sonda en un recipiente con agua y haremos el vacío a -70 kPa (-70 cbar). Dejándola en estas condiciones unas 24 horas. Tras este período abriremos la llave y comprobaremos que la

sonda ha mantenido el vacío, en cuyo caso oiremos un sonido característico y podremos obtener muestra en su interior, en el caso de que hayamos procedido a la limpieza de la sonda con ácido se puede utilizar la limpieza con agua posterior a la aplicación de ácido, para comprobar que las sondas mantienen el vacío.

Si no se oyese el sonido característico de la pérdida de vacío, es probable que alguna junta no esté bien sellada y habrá que repararla.

Si mantiene el nivel de vacío pero no hay agua en su interior puede ocurrir que los poros de la cerámica estén taponados por partículas de arcilla o precipitación de sales. En este caso, es aconsejable lavarla de nuevo con ácido, que según mi experiencia es suficiente para regularizar su funcionamiento, este problema se suele plantear algunas veces en sondas que ya se han utilizado durante largo tiempo (varios años) y que no se han limpiado adecuadamente entre campañas de cultivo.

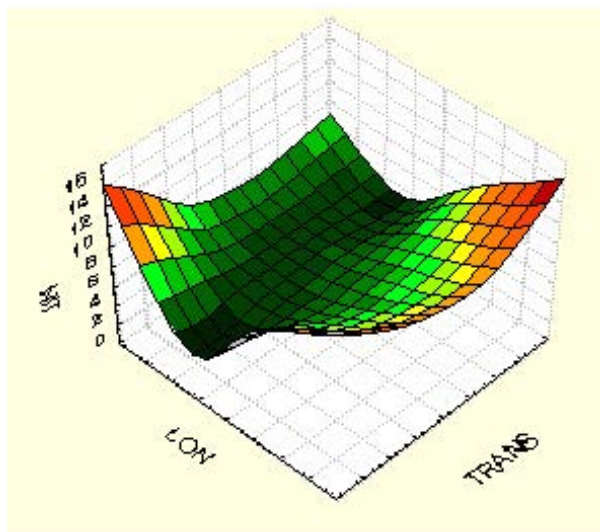
5.3. ¿Dónde colocar las sondas y cuantas debemos instalar en cada invernadero?

Se sabe que no existe una distribución uniforme de los nutrientes en la disolución del suelo en toda la superficie del invernadero, por lo tanto un punto no sería representativo del mismo, por otra parte el ubicar gran número de sondas en un invernadero no sería ni operativo ni económico. En el Gráfico 1 podemos ver la distribución espacial de la concentración de nitrato en la disolución del suelo en toda la superficie del invernadero. Los ejes X e Y representan los ejes longitudinales y transversales del invernadero respectivamente.

Atendiendo a estas premisas, se considera que se deben muestrear al menos tres puntos por invernadero, uno en el centro y otro en la zona suroeste y otro en la zona noreste. De tal forma que se recojan las diferencias generales existentes en el cultivo.

Según la posición de las sondas respecto a la planta, la situación ideal de la sonda sería aquella equidistante entre el emisor y el cuello de la planta y a una profundidad de unos 10 cm una vez apartada la arena, de esta forma queda en la zona superficial del suelo donde la densidad de raíces es mayor pero que se encuentra totalmente enterrada.

Gráfico 1. Distribución espacial de la concentración de nitrato en toda la superficie del invernadero



5.4. ¿Cómo se instalan?

Los pasos a seguir son los siguientes:

- Retirar la arena y el estiércol si lo hay, con cuidado para devolverlos posteriormente en el mismo orden, y dejar «la tierra» visible.
- Con una barrena de diámetro ligeramente inferior al de la sonda realizamos un agujero a la profundidad antes indicada. Si el suelo estuviese seco o muy duro es recomendable añadir previamente un poco de agua para evitar que la sonda se rompa al entrar. Si encontramos materiales gruesos cambiaremos el punto de muestreo.
- Introduciremos la sonda hasta el fondo del agujero, cerciorándonos de que no quede una bolsa de aire debajo de la cápsula que puede provocar su descarga posterior.
- Es importante que la cerámica se encuentre saturada de agua para que se mantenga un flujo continuo entre la disolución del suelo, los poros de la cápsula y la disolución de suelo extraída facilitando el flujo de la disolución del suelo a través de la pared de la cápsula. Por ello debemos mantenerla en agua hasta poco antes de su instalación.

- Con los dedos apretamos en torno a la sonda hasta que consigamos un buen contacto del suelo. Posteriormente añadiremos agua para facilitar dicho contacto y conseguir una adecuada interfase suelo-sonda.
- Devolvemos el estiércol y la arena a su lugar, con lo cual la sonda queda instalada.

En la Figura 5 se muestran algunos aspectos del manejo de las sondas de succión: instalación, carga, ubicación en campo y toma de muestras de la disolución del suelo.

Figura 5. Instalación (A), carga (B), ubicación en campo (C) y toma de muestras de la disolución del suelo mediante sondas de succión (D)



5.5. Toma de muestras

La toma de muestras mediante la sonda de succión deberá adecuarse al sistema de riego de la zona y en especial a su frecuencia.

El momento que consideramos más representativo para obtener la muestra de disolución del suelo es aquel más alejado del riego, ya que la disolución nutritiva estará más alterada y la disolución que obtengamos presentará de forma más acusada las alteraciones que debamos corregir posteriormente.

Establecidas estas premisas y teniendo en cuenta que la sonda debe de estar un período de 24 horas en campo tras la aplicación del nivel de vacío, consideramos que esta se debe cargar 24 horas antes del riego siguiente y se recogerá inmediatamente antes de regar.

Denominamos cargar la sonda a generarle vacío mediante una bomba, la cual lleva acoplada un vacuómetro. El nivel de vacío aplicado es de -70 KPa.

Las operaciones a realizar son las siguientes:

- Se abre la válvula, que debe permanecer cerrada entre muestreos para evitar la entrada de elementos contaminantes.
- Se conecta el tubo flexible de la bomba.
- Se aplica vacío hasta -70 KPa, se cierra la válvula y se desconecta el tubo flexible.
- A las 24 horas se abre la válvula y se extrae la muestra de disolución del suelo mediante un tubo rígido conectado a una jeringa que recoge la muestra albergada en el tubo de la sonda de succión.

Las muestras se deben de recoger en un recipiente limpio bien de vidrio bien de plástico. Directamente en campo podemos medir pH y CE mediante pHm y conductivímetros de campo. Si queremos medir la concentración de nutrientes de la disolución del suelo podemos medirlo directamente mediante análisis rápidos, a los que se dedica un capítulo en este libro, o bien llevarlos al laboratorio de análisis. Si las medidas no las realizamos rápidamente, las muestras deben de conservarse en el frigorífico para evitar alteraciones.

6. Número de muestreos a lo largo del cultivo

En los cultivos en suelo hemos observado que la disolución del suelo no se modifica de forma instantánea, es lo que tantas veces hemos oído sobre la gran inercia que presenta el suelo. También cabe resaltar que los parámetros

nutricionales no se modifican de igual forma. Es necesario observar las tendencias para una instalación concreta, ya que tanto la dosis como la frecuencia de riego, así como la concentración de elementos nutritivos modifican la disolución de suelo, por otra parte las tasas de crecimiento y fructificación del cultivo también modifican la disolución del suelo. A su vez el crecimiento y la fructificación se encuentran afectados por los parámetros climáticos y fenológicos.

No solo es importante conocer el nivel de un determinado elemento en la disolución del suelo en un momento dado sino conocer la tendencia de estos elementos en el tiempo.

Puedo aconsejar controles generales cada 15 días y en el caso de que se presenten problemas específicos muestrear más a menudo para obtener información del parámetro que presente anomalías y poder tomar decisiones para su corrección.

7. Parámetros de referencia

En este epígrafe voy a presentar los valores orientativos de los parámetros nutritivos de la disolución nutritiva y de la disolución del suelo correspondientes a cultivo de tomate en la zona del poniente y algunos comentarios de datos que presentan especial interés.

Tabla 1. Valores orientativos de los parámetros nutricionales en la disolución nutritiva y en la disolución del suelo en invernaderos de la zona del poniente almeriense en cultivo de tomate

Parámetro nutritivo	Disolución nutritiva	Disolución del suelo
pH	6.0 ± 1.4	7.8 ± 0.3
CE	2.4 ± 0.8	2.9 ± 0.8
Nitratos (NO ₃ ⁻)	11.7 ± 4.0	12.7 ± 6.3
Amonio (NH ₄ ⁺)	1.6 ± 1.7	0.7 ± 0.9
Fosfatos (H ₂ PO ₄ ⁻)	1.3 ± 0.7	0.2 ± 0.2
Potasio (K ⁺)	7.9 ± 5.7	6.0 ± 2.9
Calcio (Ca ²⁺)	3.5 ± 1.1	5.5 ± 2.1
Magnesio (Mg ²⁺)	1.9 ± 0.9	4.2 ± 1.7
Sodio (Na ⁺)	4.5 ± 3.4	6.9 ± 4.5
Cloruros (Cl ⁻)	4.8 ± 4.1	7.3 ± 5.9

*CE expresada en dS m⁻¹ y la concentración de los elementos en mmol L⁻¹.

Se puede observar que hay una tendencia a acidificar las disoluciones nutritivas presentando un pH entorno a 6, estos valores corresponden con las recomendaciones bibliográficas, que consideran que los niveles de absorción de los distintos elementos se optimiza a pH comprendidos entre 5.5-6, sin embargo, este esfuerzo no se traduce en el mantenimiento del pH en la disolución del suelo, como se puede ver está en torno a 7,8. Esto es debido a la presencia de calcita y dolomita en el suelo. Comentar que este parámetro no lo podremos controlar a nivel de la disolución del suelo y por tanto en cultivos en suelo no es necesario un ajuste preciso, si nos interesa la aplicación de ácido bien por ajustar los niveles de nitratos bien por mantener microelementos en disolución podemos acidificar la disolución nutritiva, pero sabiendo que la incidencia sobre el pH de la disolución del suelo va a ser baja.

La conductividad eléctrica de la disolución nutritiva presenta valores entre 1,6 y 3,2 dS m⁻¹ que se consideran valores adecuados para el cultivo de tomate. La disolución del suelo presenta valores superiores entre 2,1 y 3,7 dS m⁻¹, que también se encuentran en un entorno adecuado. Algunos valores podrían parecer un poco altos pero hay que considerar que el cultivo en nuestra zona se lleva a cabo en condiciones de invierno y esto permite mantener conductividades mayores, sin que el cultivo sufra daños ni mermas productivas, es más, suele tener un efecto positivo sobre la calidad.

La conductividad eléctrica de la disolución del suelo nos aporta gran información. Por una parte nos ofrece un valor global de las sales que se encuentran en la disolución del suelo, estas sales son las aportadas por la disolución nutritiva y por el propio suelo, en el primer caso provienen del agua de riego y de los fertilizantes aplicados.

Los niveles medios de nitrato en la disolución nutritiva se encuentran entre 11,3 y 12,1 mmol L⁻¹. Estos niveles a primera vista parecen adecuados, sin embargo, con estas aplicaciones en distintos invernaderos nos hemos encontrado situaciones muy diferentes de la disolución del suelo, desde niveles de 7 hasta 24 mmol L⁻¹, debido bien a un momento de fuerte demanda del cultivo, bien a la mineralización de materia orgánica que aporta nitratos a la disolución del suelo. Con esto lo que quiero es hacer notar que no existe un nivel adecuado de nitrato para la disolución nutritiva sino que puede variar mucho en función de condiciones concretas y que constituye el elemento por excelencia que necesita un control muy estricto a través de la disolución del suelo. Las causas que generan estas variaciones de gran amplitud son: las altas tasas de absorción por el cultivo, las variaciones de nitratos generadas por la

tasa de descomposición de la materia orgánica, que a su vez está influenciada por la temperatura y la vida microbiana, así como ser un elemento móvil en el suelo que se lixivia con facilidad.

Las repercusiones de un nivel inadecuado de nitratos afectan fundamentalmente al crecimiento y a la producción del cultivo así como al medio ambiente, por las tasas de lixiviación que presenta. Mi recomendación es realizar un seguimiento de este ión a lo largo del cultivo, mediante el empleo de test rápidos de bajo coste y fácil manejo.

Comentar que el ión amonio se emplea en bajas cantidades en fertirriego y esto viene motivado por los efectos fitotóxicos encontrados en sistemas hidropónicos, aunque no se han observado en cultivo en suelo. Incluso decir que tradicionalmente y durante más de 20 años se ha empleado el nitrato amónico al 33 % (NH_4NO_3) en nuestros invernaderos y no se han descrito efectos de fitotoxicidad generada por amonio. También es interesante remarcar que el amonio se mantiene en el suelo en las bases de cambio y por tanto la aportación de nitrógeno en forma amoniacal podría ser un método adecuado para disminuir los niveles de lixiviación de nitratos.

Los niveles de fosfatos en la disolución del suelo son muy bajos, en comparación con los niveles aportados, ya que al llegar al suelo precipitan como fosfatos de calcio y magnesio quedando en disolución niveles muy bajos. Considero que en el suelo se genera un almacén de fosfatos sólidos que se encuentra en equilibrio con los fosfatos en disolución, y cuando estos disminuyen debido a la absorción del cultivo, el nivel de fosfatos en la disolución del suelo se restablece. En cualquier caso, debemos de saber que mayores aplicaciones de fosfatos no redundan en mayores concentraciones en la disolución del suelo, sino que precipitan no estando disponibles directamente para la planta.

Los niveles medios de potasio oscilan desde 3,1 a 8,9 mmol L⁻¹, estas variaciones se deben considerar en función de los estadios fenológicos del cultivo, considerando los rangos más bajos para el estado vegetativo y los niveles más altos para desarrollo de frutos.

Calcio y magnesio presentan valores altos debido a la influencia del suelo, rico en dolomita, la cual proporciona un enriquecimiento de la disolución del suelo, otra de las consideraciones al tema son los altos niveles de magnesio en esta disolución, que presenta la misma génesis.

Es frecuente en cultivo de tomate en el sureste peninsular la aparición de síntomas de la fisiopatía de carencia de calcio en la zona apical del fruto

(BER), esta carencia de calcio a nivel de fruto se ha tratado de relacionar con deficiencias nutricionales de calcio en el cultivo, es decir con niveles bajos de calcio en la disolución del suelo. Hemos trabajado en casos que se han presentado en explotaciones comerciales y siempre hemos encontrado niveles de calcio en la disolución del suelo superiores a los recomendados en bibliografía para cultivo de tomate. Por lo tanto parece más recomendable incidir en parámetros relacionados con el movimiento de savia en la planta, que en aportaciones masivas de calcio, que pueden llegar a ser contraproducentes.

Los valores de sodio y cloruros en este caso son bajos ya que estos invernaderos se riegan con agua de buena calidad ($0,6 \text{ dS m}^{-1}$), es interesante observar que ambos parámetros presentan niveles similares, por lo tanto en seguimientos del cultivo para la gestión de riego no es necesario medir ambos parámetros, sino aquel que nos sea más sencillo, no obstante es recomendable medir el nivel de sodio, ya que los niveles de absorción por el cultivo son inferiores a los de cloruros.

Para utilizar como criterio en zonas con mayor salinidad, debemos conocer los niveles de sodio y cloruros del agua de riego y de la disolución del suelo antes de iniciar el cultivo, ya que este se ha podido salinizar en campañas anteriores de cultivo. Según nuestra experiencia siempre se sufre una cierta acumulación de estos iones en la disolución del suelo en torno a $2 \text{ o } 3 \text{ mmol L}^{-1}$ sobre los niveles del agua de riego, incluso cuando se ha llevado una gestión del fertirriego adecuada durante el cultivo.

8. Como nos ayudan las sondas a mejorar el fertirriego

Utilizando como equipamiento de medida, tensiómetros y sondas de succión, podemos actuar sobre el riego (dosis y frecuencia) así como sobre la aplicación de fertilizantes, para conseguir mejorar la gestión tanto de los recursos hídricos como nutricionales y disminuir los lixiviados evitando en gran medida la contaminación de nuestros acuíferos.

Las sondas de succión nos ofrecen información para gestionar el fertirriego de explotaciones comerciales en el control de los siguientes parámetros:

- Potencial hídrico del suelo: potencial mátrico y potencial osmótico
- Estado nutricional: cantidad y equilibrio de nutrientes.

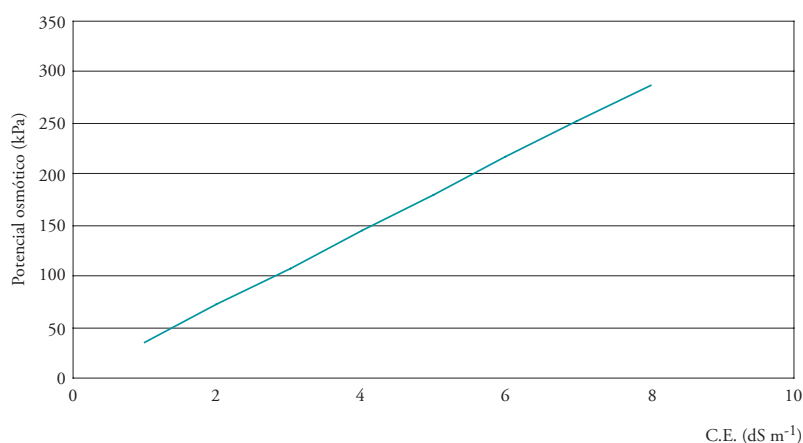
La planta para absorber agua y nutrientes debe de superar el potencial hídrico del suelo. Cuanto mayor sea este, mayor coste energético tiene la planta, en detrimento del crecimiento y del desarrollo de la misma.

El potencial hídrico tiene 2 componentes fundamentales: el potencial mátrico que se relaciona con la energía de retención del agua por el suelo y el potencial osmótico que depende de la cantidad y del tipo de sales disueltas en el agua.

Conociendo la conductividad eléctrica de la disolución del suelo podemos calcular el potencial osmótico según la ecuación propuesta por USLL en 1954 (Gráfico 2).

$$\Psi_o \text{ (KPa)} = 36 \times \text{CE}(\text{dS m}^{-1})$$

Gráfico 2. Relación entre CE (dS m^{-1}) y potencial osmótico según la ecuación propuesta por USLL (1954). En kPa

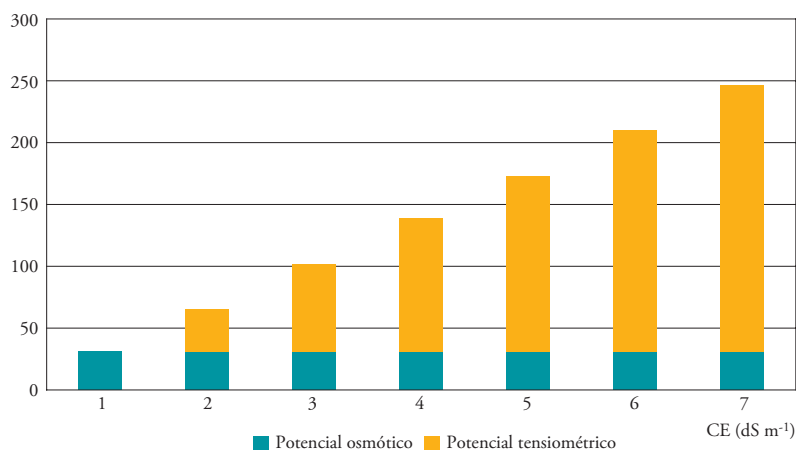


El potencial osmótico del suelo, puede presentar distintos orígenes, o bien sales aportadas por el agua de riego, o aplicación excesiva de fertilizantes.

En nuestras condiciones de cultivo el potencial osmótico es más importante que el potencial mátrico. En el Gráfico 3 se presenta la importancia del potencial osmótico en el potencial hídrico total en función de la conductividad eléctrica de la disolución del suelo. He utilizado como valor de referencia de lectura tensiométrica 30 KPa (30 cb), valor extremo que marca la frecuencia de riegos en nuestros invernaderos. Me gustaría resaltar que incluso con una conductividad eléctrica de 2 dS m^{-1} de la disolución del suelo, más del

55 % del esfuerzo que tiene que realizar la planta para absorber el agua se debe a las sales disueltas. Con esto quiero dejar claro que debemos prestarle especial atención al potencial osmótico y que una de las posibilidades de conocer la conductividad de la disolución del suelo es su obtención con las sondas de succión.

Gráfico 3. Contribución teórica del potencial osmótico (ψ_o) al potencial hídrico total (ψ_t), considerando un potencial mátrico de -30 kPa



Un paso más es conocer a que se debe esta conductividad eléctrica, si a un manejo inadecuado del riego, a una acumulación previa al cultivo de sales en el suelo o a un exceso en la aplicación de fertilizantes. Para ello se debe comparar la concentración de sodio en la solución nutritiva y en la disolución de suelo. En el Gráfico 4 se presentan concentraciones de sodio (Na^+) de la disolución del suelo. Observando las columnas de la izquierda se aprecia que la concentración en la disolución del suelo es muy superior a la de la disolución nutritiva y debemos proceder a incrementar las dosis de riego para favorecer el lavado del mismo. En las columnas de la derecha, los niveles son similares y podemos considerar que hay un manejo adecuado del riego.

Para valorar en un momento dado si la aplicación de nutrientes es adecuada, podemos recurrir a la misma metodología, pero valorando los parámetros nutricionales. Observando el Gráfico 5, vemos que las columnas de la izquierda muestran, que aunque la aplicación está dentro de los rangos

adecuados, la disolución del suelo presenta una concentración excesiva y por lo tanto debemos disminuir las aportaciones, hasta conseguir las concentraciones adecuadas en la disolución del suelo. Sin embargo, en las columnas de la derecha del mismo gráfico, con la misma aplicación encontramos concentraciones adecuadas en la disolución del suelo.

Gráfico 4. Concentraciones de sodio en la disolución nutritiva y en la disolución del suelo, que nos permiten evaluar si el riego es adecuado. En mmol L^{-1}

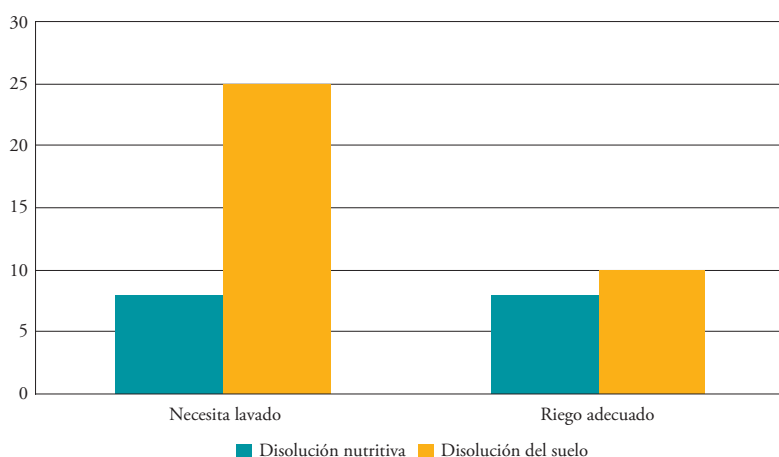
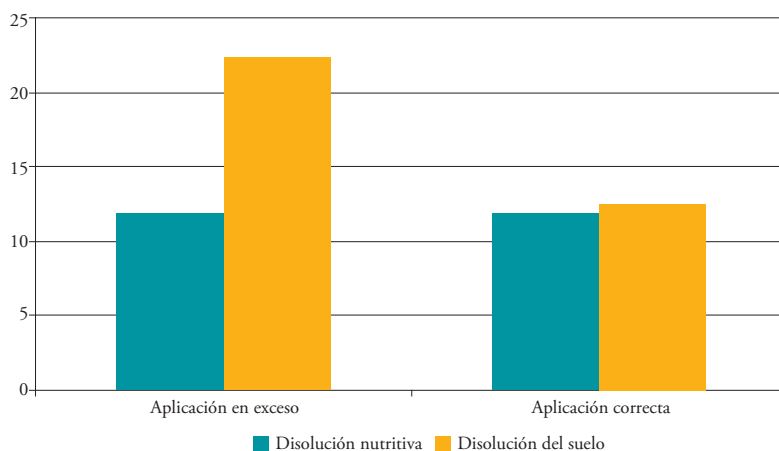
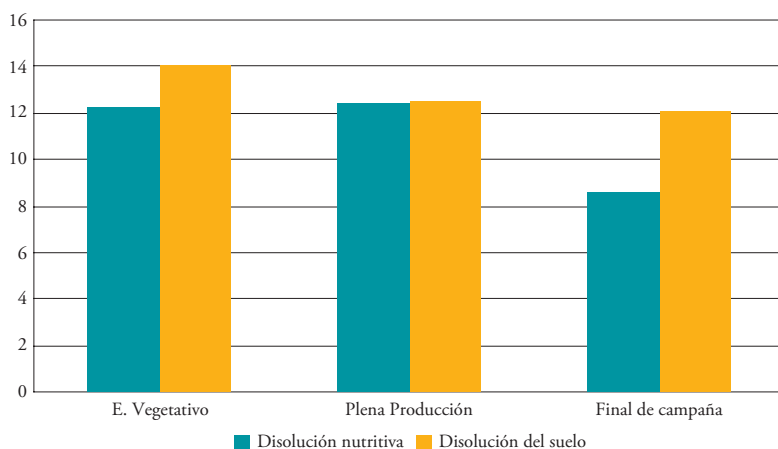


Gráfico 5. Concentraciones de nitrato (NO_3^-) en la disolución nutritiva y en la disolución del suelo, que nos permiten evaluar si la aplicación es adecuada. En mmol L^{-1}



Otro aspecto importante a considerar es la tendencia que experimenta la concentración de un nutriente a lo largo del cultivo y su corrección. En el Gráfico 6 observamos un exceso de nitratos en la disolución del suelo que puede ser debido a una menor absorción por el cultivo o a liberación de nitratos por la descomposición del estiércol. Sin embargo cuando entramos en plena producción observamos una bajada de nitratos que se estabiliza a lo largo del cultivo, incluso cuando los niveles de nitratos aplicados a final de campaña disminuyen, los niveles en la disolución del suelo se mantienen.

Gráfico 6. Evolución de la disolución nutritiva y de suelo a lo largo del cultivo en tres etapas: vegetativo, plena producción y periodo final de campaña



Referencias bibliográficas

- LAO, M. T. (1998): «Gestión del fertirriego de los invernaderos de Almería mediante el uso de sondas de succión»; *Tesis Doctoral*. Universidad de Almería.
- LAWLOR, D. W. (1991): «Concepts of nutrition in relation to cellular processes and environment» en PORTER, J. R. y LAWLOR, D. W., eds.: *Plant growth interactions with nutrition and environment*. Reino Unido, Cambridge University Press; pp. 1-32.
- MASCHNER, H. (1995): *Mineral nutrition of higher plants 2nd edition*. Londres, Academy Press.

- EPSTEIN, E. y BLOOM, A. J. (2004): «Mineral nutrition of plants: principles and perspectives»; *Second ed. Sinauer Associates, Inc. Publishers*. EEUU, Sunderland.
- CADAHÍA, C. (1997): «Fertilización. Conceptos básicos»; en *I Congreso Ibérico y III Nacional de Fertirrigación*.
- LE BOT, J.; ADAMOWICZ, S. y ROBIN, P. (1998): «Modelling plant nutrition of horticultural crops: a review»; *Sci. Hort.*; pp. 74, 47.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (1954): «U. S. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils; *Agriculture handbook* (60). EEUU, Washington.

Manejo mejorado del riego y la fertilización mediante el uso de tensiómetros y sondas de succión en cultivos intensivos

*María Rosa Granados^(a), Rodney B. Thompson^(a),
María Dolores Fernández^(b) y Marisa Gallardo^(a)*

^aUniversidad de Almería y ^bEstación Experimental de Cajamar

1. Introducción

En la provincia de Almería se encuentra la mayor zona de producción hortícola protegida de España, y la mayor concentración de invernaderos a nivel mundial, con una superficie aproximada de 28.576 ha (Junta de Andalucía, 2013). Aproximadamente el 80 % de la superficie hortícola de invernadero del sureste peninsular se cultiva en suelo, utilizando riego por goteo localizado. La aplicación de nutrientes se realiza mediante fertirriego. Esta tecnología, ya presente, permite el control automático del riego y la fertilización, por lo cual existe la capacidad técnica para un manejo preciso del riego y de los nutrientes. Sin embargo, este manejo está basado en la experiencia del agricultor (Thompson *et al.*, 2007), por lo cual la capacidad técnica para un riego y una fertilización precisas no está siendo utilizada.

Por otro lado, en el desarrollo de un sistema agrícola intensivo sostenible es importante considerar la contaminación de recursos hídricos por nitratos procedentes de fuentes agrarias. Una extensa superficie de los acuíferos superiores del Campo de Dalías presentan concentraciones de hasta 200 mg de $\text{NO}_3 \text{ L}^{-1}$, siendo este valor cuatro veces superior al límite establecido por la UE y por tanto esta superficie ha sido declarada como zona vulnerable a la contaminación por nitratos, lo que implica la obligación de adoptar prácticas de manejo encaminadas a la reducción de la pérdida de nitratos por lixiviación.

Dado que el contenido de nitratos de las aguas subterráneas que abastecen estos acuíferos es muy bajo, parece evidente que los elevados niveles provienen de la lixiviación desde la industria hortícola, por tanto, las prácticas convencio-

nales de manejo de cultivos en esta zona están asociadas a pérdidas importantes de nitratos por lixiviación. Las principales prácticas de manejo responsables de estas pérdidas de nitratos son: (i) aplicación de volúmenes importantes de agua para la desinfección química del suelo y en los riegos de pretrasplante, (ii) riegos frecuentes y excesivos durante el establecimiento de las plántulas, en las primeras semanas de cultivo, (iii) aplicaciones importantes de estiércol en la construcción de los invernaderos y de forma periódica posteriormente y (iv) fertilización nitrogenada excesiva durante el periodo de cultivo.

El objetivo de este trabajo fue plantear prácticas culturales encaminadas a la reducción del drenaje y lixiviación de nitratos y su consecuente efecto medioambiental, y en particular, el uso de las sondas de succión para controlar la concentración de nitratos en la solución de suelo.

2. Material y métodos

Este trabajo se desarrolló en dos invernaderos con suelo enarenado, típico de la comarca, en la Estación Experimental Cajamar (Almería, El Ejido, Santa María del Águila) (Figura 1).

Figura 1. Invernadero con suelo enarenado



En uno de los dos invernaderos se realizó un manejo de cultivo convencional, encaminado a la determinación de la magnitud de la lixiviación de nitratos desde sistemas de cultivo locales. En el otro invernadero se desarrolló

un manejo prescriptivo-correctivo consistente en: (i) evitar un volumen excesivo de riego, considerando estimaciones de evapotranspiración del cultivo y medidas de la humedad del suelo, y (ii) evitar un aporte excesivo de N, considerando un aporte de nitratos en base a la predicción de nitrógeno extraído por la planta de forma semanal, calculado mediante un modelo funcional, construido mediante datos determinados localmente, y validado mediante otros ensayos realizados en la zona, combinado con el análisis de la evolución de la concentración de nitratos en el suelo, a lo largo de la secuencia de cultivo (Granados, 2011).

En la Figura 2 podemos ver como en 2006 se desarrolló un cultivo de pimiento cultivar Vergasa.

Figura 2. Cultivo de pimiento cultivar Vergasa



El trasplante se realizó el 20 de julio de 2006 en dos invernaderos similares. El ciclo de cultivo fue de 201 días (hasta el 6 de febrero de 2007). En uno de los invernaderos se realizó un manejo convencional, y en el otro se realizó un manejo prescriptivo-correctivo. La prescripción del riego (plan de riego) se basó en la estimación de las necesidades de riego calculadas con el programa PrHo (Fernández *et al.*, 2001). La prescripción de la fertilización nitrogenada (plan de abonado de N) se basó en la estimación de los requerimientos de N

del cultivo calculados con un modelo de simulación (Granados, 2011). La corrección del riego prescrito en pimiento se realizó mediante el mantenimiento del potencial mátrico del suelo, medido con tensiómetros (Figura 3), entre -10 y -40 kPa.

Figura 3. Tensiómetros



La corrección del aporte estimado de N en pimiento se basó en mantener la concentración de NO_3^- en la solución del suelo entre 8-12 mmol L^{-1} . Se consideró que concentraciones mayores de 12 mmol L^{-1} están asociadas con aplicaciones excesivas de N. Para el muestreo de la solución de suelo se utilizaron 6 sondas de succión modelo 1900L12 (Soil Moisture Co., Santa Bárbara, CA, USA) en cada invernadero (Figura 4).

Las sondas de succión fueron instaladas a 15 cm de profundidad y a 8 cm de distancia de la planta, y el muestreo se realizó semanalmente siguiendo la metodología descrita en Granados *et al.*, 2008.

También se recogió el drenaje mediante lisímetros de drenaje libre (4 m longitud x 2 m ancho x 0,6 cm profundidad; Figura 5) descritos por Granados (2011).

Figura 4. Sondas de succión



Figura 5. Lisímetro en construcción



En cada invernadero existían dos lisímetros con recogida de drenaje independientes para la evaluación de dos repeticiones en cada tratamiento. Se midió el volumen drenado en cada lisímetro, y se analizó la concentración de nitratos en la solución drenada. Dentro y fuera de lisímetro la densidad de plantación fue de 2 plantas m^{-2} .

3. Resultados

Si nos basamos en el manejo prescriptivo-correctivo, el riego aplicado en pimiento fue 293 mm frente a 351 mm en el manejo convencional (Gráfico 1a). El volumen de drenaje en el manejo prescriptivo-correctivo fue 61 mm comparado con 129 mm en el manejo convencional (Gráfico 1b). El drenaje asociado con el manejo prescriptivo-correctivo fue equivalente al 20 % respecto al volumen aplicado, frente a un 37 % con en el manejo convencional (Gráfico 1b). El aporte total de N al cultivo con manejo prescriptivo-correctivo fue 316 kg N ha^{-1} frente a 490 kg N ha^{-1} en el manejo convencional (Gráfico 2a). La cantidad de N lixiviada tras el tratamiento prescriptivo-correctivo fue 91 kg N ha^{-1} frente a 215 kg N ha^{-1} en el manejo convencional (Gráfico 2b). La cantidad de N lixiviado fue equivalente a un 29 % del N aportado en manejo prescriptivo-correctivo (Gráfico 2b) comparado con un 44 % en el tratamiento convencional. De la totalidad de N lixiviado durante el cultivo, un 30 % se produjo durante las tres primeras semanas de cultivo (Gráfico 2b).

La concentración de nitratos en el drenaje estuvo muy por encima del límite establecido por la UE (0,8 mmol L^{-1}), alcanzando concentraciones de 18 mmol L^{-1} durante los últimos dos meses de cultivo en el tratamiento convencional. Este nivel se superó incluso en los drenajes asociados a riegos sin aporte de nitratos al inicio del cultivo (6-12 mmol L^{-1}), debido a la presencia de N en el suelo procedente de cultivos anteriores manejados con una fertilización excesiva (datos no presentados) y las aplicaciones anteriores de estiércol que aportan considerables cantidades de N.

El uso de fertilización basada en un manejo prescriptivo-correctivo supuso un 40 % de menor aporte de N respecto al tratamiento convencional (Gráfico 2a). Al inicio del cultivo en la solución nutritiva aportada en este tratamiento fue de 10 mmol L^{-1} , y durante los últimos 5 meses de cultivo la concentración en el aporte fue de 8 mmol L^{-1} (Gráfico 3a). Con estas concentraciones de nitratos, en el agua aportada al cultivo de pimiento con manejo prescriptivo-correctivo, la concentración de nitratos en la solución del suelo se mantuvo entre 8 y 12 mmol L^{-1} (Gráfico 3b). En el invernadero manejado de forma convencional esta concentración aumentó a lo largo del cultivo hasta 23 mmol L^{-1} (Gráfico 3b), indicando un aporte excesivo de fertilizante, que es susceptible de ser lixiviado durante ciclos de cultivo posteriores.

La producción de pimiento no se vio afectada por el menor aporte de N en el tratamiento mejorado, basado en un manejo prescriptivo-correctivo. La producción total fue $9,7$ y $10,4 \text{ kg m}^{-2}$ en los tratamientos MC y MM, respectivamente.

Gráfico 1. Riego (a) y drenaje (b) en invernadero cultivado con pimiento manejado de forma convencional (MC) y mejorado (MM). En mm

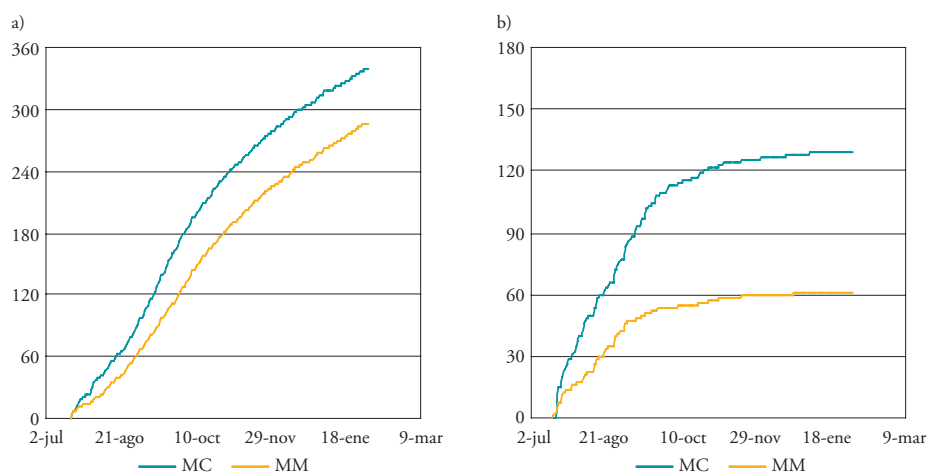


Gráfico 2. Nitrógeno aportado (a) y lixiviado (b) en invernadero cultivado con pimiento manejado de forma convencional (MC) y mejorado (MM). En kg ha⁻¹

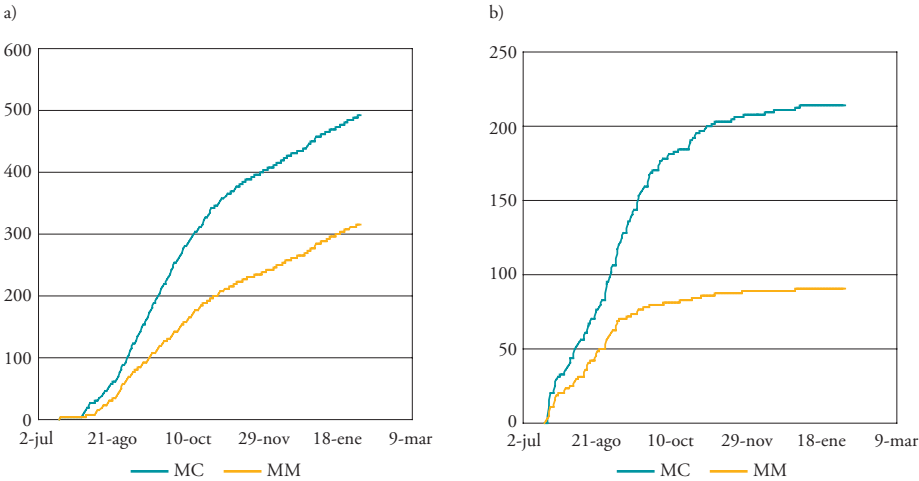
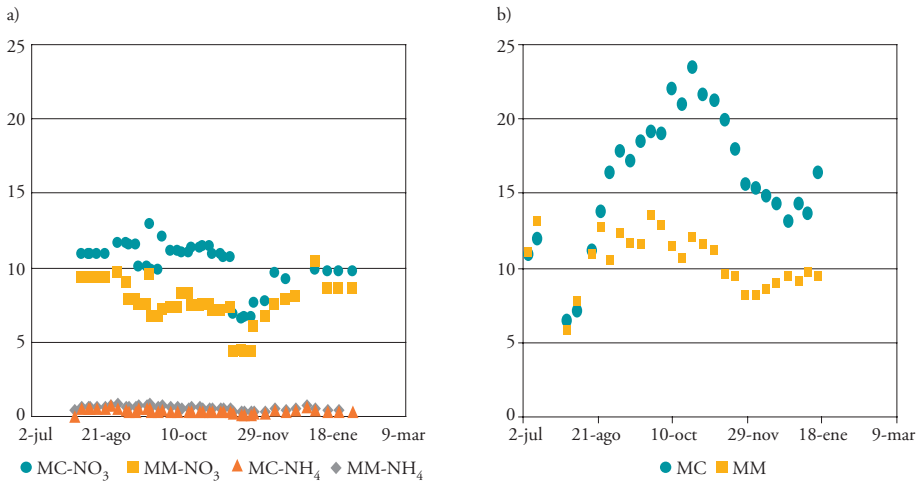


Gráfico 3. Concentración de nitratos en el drenaje (a) y en la solución de suelo extraída con sondas de succión (b) en invernadero cultivado con pimiento manejado de forma convencional (MC) y mejorada (MM). En mmol L⁻¹



4. Discusión

Este trabajo demostró que un manejo prescriptivo-correctivo puede ahorrar N y agua, y reducir la lixiviación de nitratos y drenaje sin una reducción en producción. Muchas de las herramientas usadas en este trabajo están disponibles para los agricultores de la zona, en particular, el programa PrHo, tensiómetros y las sondas de succión. Todavía no hay programas informáticos disponibles para calcular las necesidades de N, pero están en desarrollo. En particular, el uso de las sondas de succión para controlar la concentración de nitratos en suelo, ha demostrado ser una herramienta útil para reducir la aplicación de N y las pérdidas de NO_3^- por lixiviación en este trabajo y trabajos previos (Granados *et al.*, 2005; Granados, 2011).

Los análisis de NO_3^- se realizaron en las muestras de la solución de suelo en un laboratorio analítico. Con los sistemas de análisis rápidos (Thompson *et al.*, 2016) se puede analizar la concentración de nitratos en muestras de solución de suelo, y también en solución nutritiva en la propia finca.

Una consideración importante con el uso de las sondas de succión es la variación entre muestras. En este y en otros trabajos de la Estación Experimental de Cajamar en Almería (Granados *et al.*, 2005; 2008), ha sido posible reducir esta variación hasta niveles aceptables con procedimientos como colocación de las sondas en zonas con plantas representativas y sanas, evitando localizaciones donde haya entradas de agua desde el techo, evitando pasillos y bordes, etc.

5. Conclusiones

Se obtuvieron volúmenes apreciables de drenaje y pérdidas de nitratos por lixiviación asociadas con la práctica de manejo convencional. Los factores que contribuyen en mayor medida parecen ser la acumulación de nitratos en el suelo procedente de aplicaciones previas de estiércol y cultivos desarrollados anteriormente, y el drenaje asociado con la desinfección química de suelo, riegos pretrasplante y riegos excesivos aplicados durante el establecimiento del cultivo, y en menor medida riegos excesivos después del establecimiento del cultivo. Las concentraciones de nitratos obtenidas en el drenaje siempre fueron superiores al límite establecido por la Unión Europea en $50 \text{ mg NO}_3^- \text{ L}^{-1}$, lo cual nos indica el alto potencial de contaminación de acuíferos por nitratos procedentes de este sistema hortícola. Las prácticas de manejo mejoradas, me-

diante un tratamiento prescriptivo-correctivo, fueron evaluadas con el resultado de apreciables reducciones en el drenaje y cantidad de NO_3^- -N lixiviado, sin afectar a la producción. El manejo desarrollado en este trabajo, basado en la modelización del aporte de riego y nitrógeno resultó particularmente efectivo y con un alto potencial para la obtención de mejores resultados. Se demostró que existe un considerable potencial para el desarrollo y uso de sistemas de manejo mejorado de cultivos, que permitirán reducir el aporte de agua y N, obteniendo una gran reducción en la contaminación de acuíferos por NO_3^- , procedentes del sistema hortícola.

Concentraciones de 8 mmol L⁻¹ pueden ser sugeridas como guía para el manejo de cultivos en cultivos en nuestras condiciones.

Referencias bibliográficas

- FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ, M. D.; CÉSPEDES, A.; LÓPEZ, J. C.; PÉREZ, J. y GONZÁLEZ, A. (2001): «PrHo: programa de riego en cultivos hortícolas bajo invernadero en el sureste español»; en *Actas XIX Congreso Nacional de Riegos*. Zaragoza; pp. 29.
- JUNTA DE ANDALUCÍA (b): *Cartografía de invernaderos en el litoral de Andalucía Oriental. Campaña 2012*. España, Junta de Andalucía, Consejería de Agricultura Pesca y Medio Ambiente; p. 21.
- GRANADOS GARCÍA, M. R.; THOMPSON, R. B.; FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ, M. D.; GALLARDO, M. y GÁZQUEZ GARRIDO, J. C. (2005): «Uso de sondas de succión para el manejo de la fertilización nitrogenada en un cultivo de tomate bajo condiciones de invernadero»; en RAMOS, C. *et al.*, eds.: *Sistemas de recomendación de abonado*. Sociedad Española de Ciencias Hortícolas; pp. 79-85.
- GRANADOS GARCÍA, M. R.; THOMPSON, R. B.; FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ, M. D.; GÁZQUEZ GARRIDO, J. C.; GALLARDO, M. y MARTÍNEZ GAITÁN, C. (2008): *Reducción de la lixiviación de nitratos y manejo mejorado de nitrógeno con sondas de succión en cultivos hortícolas*. Fundación Cajamar, Almería; pp. 24. Disponible en: <http://www.publicacionescajamar.es/series-tematicas/centros-experimentales-las-palmerillas/reduccion-de-la-lixivacion-de-nitratos-y-manejo-mejorado-de-nitrogeno-con-sondas-de-succion-en-cultivos/>.

- GRANADOS GARCÍA, M. R. (2011): «Lixiviación de nitratos desde cultivo de invernadero en suelo en las condiciones de Almería: magnitud, factores determinantes y desarrollo de un sistema de manejo optimizado»; *Tesis Doctoral*. Universidad de Almería; pp. 311.
- THOMPSON, R. B.; MARTÍNEZ GAITÁN, C.; GALLARDO, M.; GIMÉNEZ, C. y FERNÁNDEZ 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); pp. 261-274. DOI: 10.1016/j.agwat.2007.01.013.
- THOMPSON, R. B.; FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ, M. D.; CÁNOVAS FERNÁNDEZ, G. y GALLARDO, M. (2017): «Aplicaciones prácticas de los sistemas de análisis rápidos de nutrientes para mejorar el manejo del nitrógeno en cultivos de invernadero»; *Mejora en la eficiencia del uso de Agua y Fertilizantes en Agricultura*. Cajamar Caja Rural; pp. 179-200.

Aplicaciones prácticas de los sistemas de análisis rápidos de nutrientes para mejorar el manejo del nitrógeno en cultivos de invernadero

*Rodney B. Thompson^(a), María Milagros Fernández Fernández^(b),
Gema Cánovas Fernández^(b) y Marisa Gallardo^(a)*

^aUniversidad de Almería e ^bIFAPA-La Mojonera

1. Introducción

El manejo del nitrógeno (N) es especialmente importante en la producción de cultivos hortícolas dado que el N: (a) es el nutriente que los cultivos requieren en mayores cantidades, (b) controla fuertemente el crecimiento vegetativo de los cultivos, y (c) es un coste importante del cultivo cuyo precio está muy vinculado al del petróleo y por tanto aumenta continuamente. Además, hay una presión creciente sobre los agricultores a adoptar prácticas de manejo que mejoren la eficiencia del uso de fertilizantes nitrogenados debido a los problemas ambientales asociados con las pérdidas de N desde la agricultura al medio ambiente. En el sureste peninsular, la contaminación de los acuíferos con nitratos (NO_3^-) en las áreas donde se distribuyen los invernaderos es un problema cada vez más importante. Las zonas del Campo de Dalías, Bajo Andarax y Campo de Níjar han sido declaradas zonas vulnerables a la contaminación por nitratos por el Decreto 36/2008 de 5 de febrero de la Junta de Andalucía. Esto significa que los acuíferos en estas áreas están claramente contaminados por NO_3^- derivado de la agricultura y que hay una obligación legal para reducir la lixiviación de NO_3^- desde los invernaderos. Además de las consideraciones ambientales, las elevadas pérdidas de N al medio ambiente representan una pérdida económica para el agricultor. La capacidad de analizar de forma rápida el NO_3^- en medios acuosos en la finca puede ayudar a los agricultores a una gestión más eficiente del N, permitiendo aplicar las concentraciones de N deseadas y, facilitar la adopción de prácticas de manejo de nutrientes como análisis de la solución del suelo y análisis de savia.

2. Características de los sistemas de análisis rápidos de nitrato

Actualmente, si un agricultor desea conocer la concentración de NO_3^- de una solución, tiene que enviar o llevar la/s muestra/s a un laboratorio analítico, y esperar varios días para recibir los resultados. El tiempo de espera y los inconvenientes involucrados disuaden a los agricultores a hacer análisis que podrían ayudar al manejo de nutrientes en su finca. Recientemente, hay disponibles comercialmente sistemas de análisis que permiten que los agricultores o técnicos puedan analizar NO_3^- en la finca en minutos. Estos sistemas de análisis deben presentar una serie de características para ser adecuados para su uso en campo por agricultores y técnicos:

- Ser pequeños y portátiles.
- Realizar un análisis en minutos.
- Tener un funcionamiento sencillo y que no requiera una formación especializada.
- Ser razonablemente precisos y mantener su precisión.
- Ser suficientemente robustos para su uso en finca.
- Tener un rango de medida adecuado para aplicaciones en las explotaciones hortícolas.
- Ser fáciles de calibrar y que mantengan la calibración.

Los objetivos principales del agricultor/técnico al usar estos sistemas son: (1) poder hacer los análisis en la misma finca y (2) en un corto período de tiempo (por ejemplo, menos de 10 minutos) de modo que el agricultor/técnico pueda tener los resultados que le permitan hacer los ajustes necesarios para el manejo de N.

3. Aplicaciones de sistemas de análisis rápidos de nitrato

1) *Control más exacto de la composición de la solución nutritiva*

En los sistemas modernos de fertirrigación, con múltiples tanques de soluciones de nutrientes concentradas, controlados por ordenador, la composición de la solución nutritiva está controlada por sensores de conductividad eléctrica (CE) y válvulas Venturi o inyectores que a menudo no están bien calibrados. El análisis periódico del NO_3^- en

la solución nutritiva permitirá que se apliquen las concentraciones de NO_3^- deseadas por el agricultor. Esto es particularmente importante en la producción de cultivos hortícolas en el sureste peninsular, donde en la mayoría de los invernaderos se aplica casi todo el N en forma de NO_3^- .

2) Seguimiento del estado de nitrógeno de los cultivos

Los dos métodos para monitorizar si la cantidad de N que se aplica a un cultivo es adecuado son:

- a) El análisis de NO_3^- en la solución del suelo extraído con sondas de succión.
- a) El análisis de NO_3^- en la savia de la planta.

Nitratos en la solución del suelo

Las muestras de la solución del suelo se extraen con sondas de succión que consisten en un tubo de plástico estrecho que termina en una capsula de cerámica porosa que se instala a la profundidad deseada en el suelo. Al mantener el vacío en el tubo, la solución del suelo entra en la cápsula de cerámica donde queda almacenada y de la que se extrae posteriormente. Sobre esta solución podemos analizar parámetros como pH, conductividad eléctrica y concentración de iones solubles en agua. Las sondas de succión y su funcionamiento se describen en otro capítulo de este libro (Lao, 2016). Un número creciente de agricultores de Almería está utilizando las sondas de succión para controlar la conductividad eléctrica (CE) de la solución del suelo.

Ha habido varios estudios en el sureste peninsular durante los últimos 10 años sobre el uso de las sondas de succión para el manejo de nitrógeno en cultivos mediante el control de la concentración de NO_3^- de la solución del suelo. En estos estudios se colocaron sondas de succión en la zona de máxima concentración de raíces. La mayoría de los trabajos previos en el sureste peninsular se realizaron con sondas de succión con diámetros de 2 hasta 5 cm a las que se aplicó el vacío con una bomba manual. En el Anexo 1 se presenta información sobre los distribuidores de sondas de succión en el sureste peninsular. Normalmente las sondas de succión consisten en un tubo con una

cápsula cerámica en el fondo y un tapón en el parte de arriba. La empresa Himarcan (Anexos 1 y 2) ha hecho algunas adaptaciones que ayudan al usuario en la aplicación del vacío y en la recogida de la muestra.

Recientemente el IFAPA La Mojonera ha utilizado sondas de succión más pequeñas conocidas como «pelos radicales», que tienen un polímero poroso de 2.5 mm de diámetro conectado a un tubo prolongador y una aguja hipodérmica y que se utilizan en combinación con tubos con el vacío preaplicado, similares a los utilizados para recoger muestras de sangre humana. Con este segundo tubo se aplica el vacío a la sonda de succión para recoger la solución del suelo y también sirve como recipiente para recoger la muestra. En comparación son las sondas de succión convencionales, los «pelos radicales» son más baratos y más fáciles de usar, pero muestrean un volumen de suelo más pequeño. Actualmente, varias cooperativas de Almería y Granada están usando estas sondas en combinación con el LAQUAtwin en un proyecto piloto en colaboración con IFAPA La Mojonera; posteriormente se presenta una descripción de este proyecto piloto. La denominación comercial de los «pelos radicales» es «Rhizon SMS (Soil Moisture Sampler)». En el Anexo 1 se presenta información sobre el distribuidor en el sureste peninsular.

Varios estudios de investigación en el sureste peninsular en la Estación Experimental de Cajamar en El Ejido (Almería) y el IFAPA-La Mojonera han demostrado que el control de la concentración de NO_3^- en la solución del suelo, en la zona de mayor concentración de raíces, se puede utilizar para reducir la cantidad de fertilizante de N aplicado y la pérdida de N por lixiviación de NO_3^- mientras que se mantiene la producción (Granados *et al.*, 2005; Granados *et al.*, 2007; Fernández Fernández *et al.*, 2011; Granados, 2011; Granados *et al.*, 2016). En estudios previos en la estación experimental se recomendó un rango de suficiencia de NO_3^- en la solución del suelo de 8 a 12 mmol L^{-1} , de forma que concentraciones superiores a 12 mmol $\text{NO}_3^- \text{L}^{-1}$ se consideraban excesivas y menores de 8 mmol $\text{NO}_3^- \text{L}^{-1}$ insuficientes para asegurar la máxima producción (Granados *et al.*, 2007; Granados, 2011). Estudios más recientes en el IFAPA-La Mojonera sugieren que la producción se puede mantener con un valor mínimo de 5 mmol $\text{NO}_3^- \text{L}^{-1}$. Otros trabajos en California (Burt *et al.*, 1995; Hartz y Hochmuth, 1996) e Israel también ha sugerido valores mínimos de 5 mmol $\text{NO}_3^- \text{L}^{-1}$ para asegurar la producción de cultivos hortícolas.

Teniendo en cuenta todos los datos disponibles, se recomienda que el NO_3^- de la solución del suelo en la zona con la mayor concentración de raíces, se

mantenga entre 5 y 12 mmol NO₃⁻ L⁻¹. Esta recomendación es para cultivos con riego por goteo y fertirrigación con aplicación frecuente de NO₃⁻ en el riego.

Nitrato en Savia

El análisis del NO₃⁻ en la savia del pecíolo indica si el estado de N de un cultivo es insuficiente, suficiente o excesivo. El análisis de savia se hace (1) separando los pecíolos de las hojas, (2) exprimiendo la savia con una prensa de ajo, y (3) analizando la concentración de NO₃⁻ en la solución exprimida. Una descripción detallada, en español, de los procedimientos del muestreo, preparación de las muestras, valores de referencia para los cultivos hortícolas y la experiencia en España, incluyendo Almería, se presenta en el libro «La savia como índice de fertilización», del Profesor Carlos Cadahía López de la Universidad de Autónoma de Madrid (Cadahía, 2008). Información similar de la Universidad de Florida en EEUU está disponible en Inglés en Internet (Hochmuth, 2015). Los valores recomendados varían entre especies y con la etapa de crecimiento, por lo tanto se recomienda consultar las fuentes de referencia más relevantes. Las concentraciones de NO₃⁻ en savia son mucho mayores que en la solución del suelo o en soluciones nutritivas; como ejemplo, el rango de suficiencia para el tomate es aproximadamente 40-60 mmol NO₃⁻ L⁻¹ (Burt *et al.*, 1995; Cadahía, 2008).

4. Equipos disponibles

En los últimos 20 años, se han comercializado varios sistemas de análisis portátiles de tamaño pequeño para la determinación de NO₃⁻ *in-situ* en la finca. Dos de ellos han demostrado a lo largo del tiempo que cumplen con la mayor parte de los requisitos para su uso en finca que se mencionaron anteriormente para los sistemas analíticos rápidos.

Estos dos sistemas son:

- 1) El LAQUAtwin para NO₃⁻ fabricado por Horiba, para determinación de nitratos y potasio.
- 2) El RQ Flex Reflectoquant fabricado por Merck.

Durante los últimos 20 años, estos dos sistemas han sido evaluados en varios estudios científicos internacionales y también se han evaluado en estudios

en el sureste español. Sus características y funcionamiento están bien establecidos. En la Tabla 1 se presentan detalles relevantes de estos dos sistemas.

Hay otros sistemas disponibles que pueden satisfacer los criterios anteriormente mencionados; sin embargo, hasta ahora no hay información objetiva disponible. Varios equipos han entrado y han sido retirados del mercado durante este período. Un equipo muy reciente y prometedor es el sistema Clean Grow del cual se recogen algunos detalles en la Tabla 1. Una observación general es que la tecnología de los sensores es un área con un desarrollo tecnológico muy rápido y es muy probable que haya nuevos sistemas analíticos en el futuro próximo. En el Anexo 1 se presenta información de proveedores del metro LAQUAtwin, RQ Flex Reflectoquant y sistema Clean Grow y en Anexo 2 información de páginas webs relevantes.

Tabla 1. Para el LAQUAtwin, RQ Flex Reflectoquant y sistema Clean Grow, métodos de análisis, rango de concentración de NO_3^- medido y coste aproximado del equipo y de cada análisis

Equipo	Método de análisis	Rango de determinación de NO_3^- (mmol/L)	Coste aproximado del equipo (€, sin IVA)*	Coste aproximado por muestra (€)
Metro LAQUAtwin para NO_3^-	Electrodo selectivo de iones	1,000 - 100,000	575	0,25
RQ Flex Reflectoquant	Reflexión de luz e intensidad del color	0,000 - 3,600	895	0,90
Sistema Clean Grow	Electrodo selectivo de iones	0,005 - 1.000,000	695 (NO_3^-) 995 ($\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$)	n. d.

* Costes disponibles en octubre 2012.

n. d.: no disponible.

LAQUAtwin

El metro LAQUAtwin (Figura 1) es un electrodo selectivo de iones que se ha utilizado para medir NO_3^- en aplicaciones hortícolas durante 20 años. El rango de concentración de análisis de NO_3^- es de 1 a 100 mmol $\text{NO}_3^- \text{ L}^{-1}$; los resultados se presentan como mg $\text{NO}_3^- \text{ N L}^{-1}$ o mg $\text{NO}_3^- \text{ L}^{-1}$. Este rango es suficiente para el análisis de las soluciones nutritivas, de solución del suelo, y muchas, pero no todas, las muestras de savia. Las medidas se realizan en menos de un minuto.

El sensor mide 17 x 3 x 2 cm y pesa 52 g. El coste estimado por análisis es 0,25 euros basado en el uso de los estándares de calibración.

Figura 1. El metro LAQUAtwin con las soluciones de calibración. A la izquierda se muestra el depósito donde se colocan las soluciones a medir. Existen modelos que permiten medir Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Cl^- y Na^+



El LAQUAtwin tiene dos electrodos para medir la concentración de NO_3^- , uno (A en la Figura 2, izquierda) está en el depósito de medida, y el otro (B en el Esquema 1 izquierda) está en el sensor. Las medidas con el LAQUAtwin se pueden realizar, 1) colocando varias gotas de la solución a medir en un depósito que tiene debajo el electrodo (Figura 2, izquierda), o 2) mediante la inserción del parte del sensor directamente en la solución (Figura 2, derecha). El procedimiento más común es utilizar el procedimiento 1. Para analizar con el LAQUAtwin no es necesario preparar las muestras ni añadir reactivos. Normalmente se puede trabajar directamente con las soluciones a medir.

En el sureste peninsular, el LAQUAtwin se ha utilizado para medir la concentración de NO_3^- en (a) soluciones nutritivas (Gráfico 1), (b) solución del suelo (Gráfico 2), y (c) savia (Gráfico 3) y para cada solución se compararon los resultados de cada análisis con los resultados de un laboratorio analítico. En cada una de las tres soluciones, el LAQUAtwin proporcionó medidas adecuada de la concentración de NO_3^- en comparación con los resultados del laboratorio.

Figura 2. Los dos procedimientos para medir la concentración de NO_3^- en solución con el LAQUAtwin (izquierda) se aplican varias gotas sobre el electrodo en la celda, (derecha) se sumerge parte del equipo en la solución. A y B en la imagen a la izquierda son los electrodos selectivos

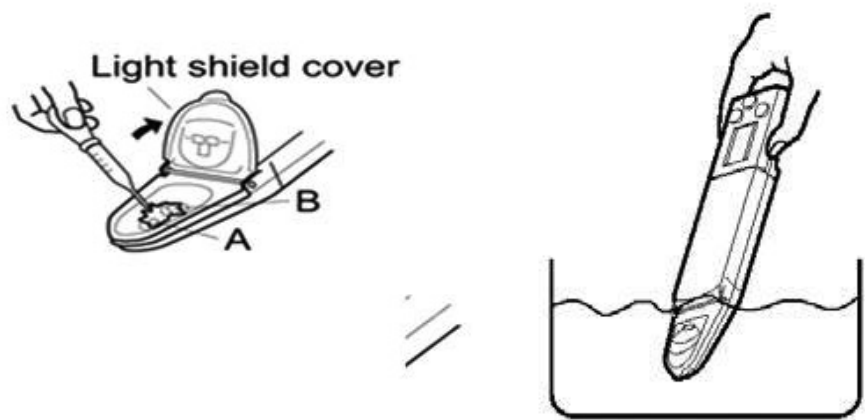
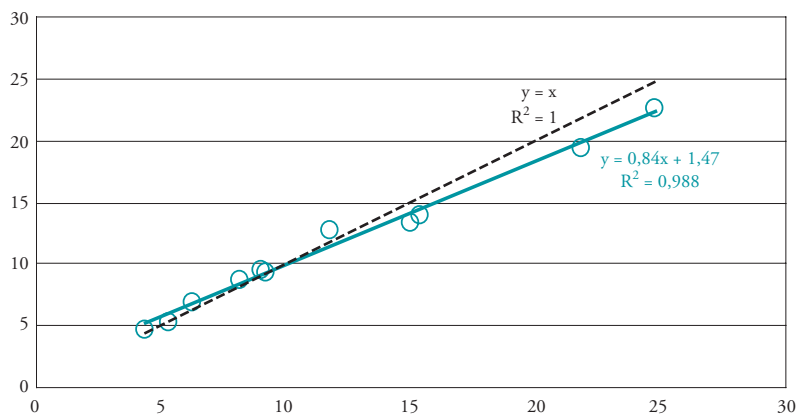
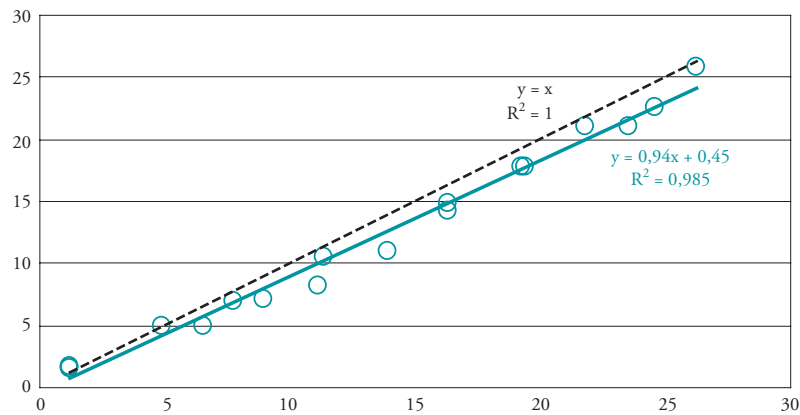


Gráfico 1. En solución nutritiva; comparación entre la concentración de NO_3^- medida con el LAQUAtwin y en un laboratorio analítico. En $\text{mmol NO}_3^- \text{ L}^{-1}$



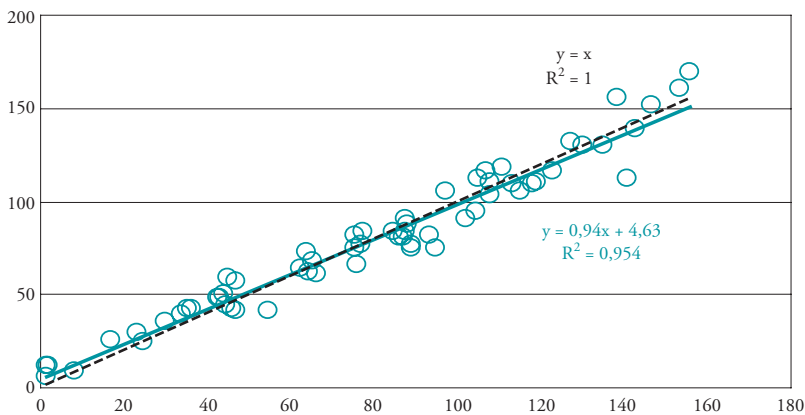
* Se presenta la línea 1:1 ($y=x$) para comparar.

Gráfico 2. En solución de suelo; comparación entre la concentración de NO_3^- medida con el LAQUAtwin y en un laboratorio analítico. En $\text{mmol NO}_3^- \text{ L}^{-1}$



* Se presenta la línea 1:1 ($y=x$) para comparar.

Gráfico 3. En savia de planta; comparación entre la concentración de NO_3^- medida con el LAQUAtwin y en un laboratorio analítico. En $\text{mmol NO}_3^- \text{ L}^{-1}$



* Se presenta la línea 1:1 ($y=x$) para comparar.

RQ Flex Reflectoquant

El RQflex Reflectoquant de Merck (Figura 3) es un reflectómetro que mide la concentración de NO_3^- y amonio (NH_4^+) en soluciones. El reflectómetro mide la intensidad del color en tiras (8 x 70 mm) que tienen una zona impregnada con reactivos. Las tiras se introducen en el equipo para leer con exactitud la intensidad del color y esta se relaciona linealmente con la concentración de la solución que se mide (Figura 4). El reflectómetro puede analizar más de 50 compuestos diferentes en soluciones. Para algunos compuestos, se añaden reactivos adicionales a la solución que se mide. Las tiras, y reactivos cuando son apropiados, se compran juntos como un kit; cada kit tiene su propia calibración que se introduce en el equipo con una tira de plástico con un código de barras magnético. En la página web de Merck (ver Anexo 2) se encuentra una descripción completa del sistema y una lista de todos los compuestos analizados. El sistema dispone de un cronómetro digital y mensajes visuales que ayudan al usuario a controlar el proceso analítico. Con esta ayuda, el proceso de análisis es sencillo. El reflectómetro se desarrolló inicialmente para el análisis de aguas superficiales en ecosistemas naturales; como consecuencia, para las aplicaciones en horticultura, el rango de concentración es algo limitado.

Figura 3. Aspecto exterior del RQ Flex reflectómetro de Merck



Figura 4. Medida con el RQ Flex reflectómetro Merck.
La tira se introduce en el equipo para tomar la medida



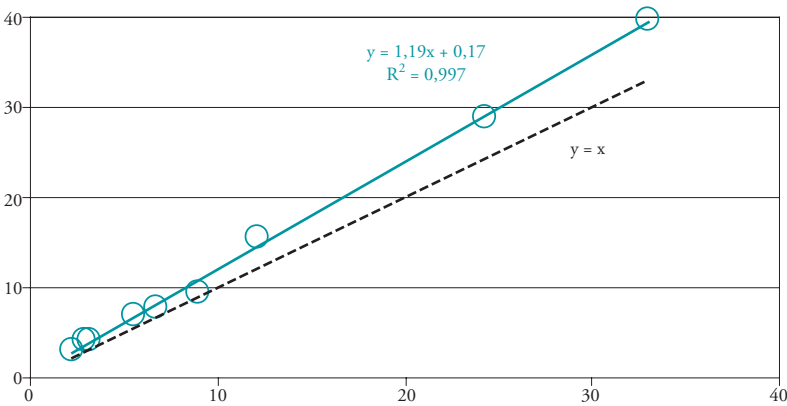
El reflectómetro mide 18 x 5 x 2,5 cm, y tiene un peso de 250 g. El análisis de la concentración de NO_3^- con el reflectómetro se realiza mediante la colocación de la tira en la solución a medir durante 2 segundos, a continuación, después de 48 segundos se coloca la tira en la zona de medida del equipo (Figura 4). Cada análisis tarda 1 minuto. Los análisis de NO_3^- se realizan sin reactivos adicionales y el rango de concentración de análisis de NO_3^- es de 1,0 a 3,6 mmol L^{-1} . Este rango es comúnmente insuficiente para aplicaciones hortícolas, y a menudo se requiere la dilución de las muestras. Para realizar una dilución exacta se utiliza una pipeta y un matraz aforado (Figura 5; Anexo 1). La realización correcta de la dilución es crítica para la fiabilidad de los resultados. Aunque, es cierto que la dilución aumenta el trabajo asociado con el análisis, muchos estudios han demostrado que con una dilución cuidadosa, el reflectómetro proporciona información precisa de la concentración de NO_3^- en aplicaciones hortícolas.

Figura 5. Ejemplos de instrumental usado en la dilución de muestras, a la izquierda una pipeta y a la derecha un matraz aforado



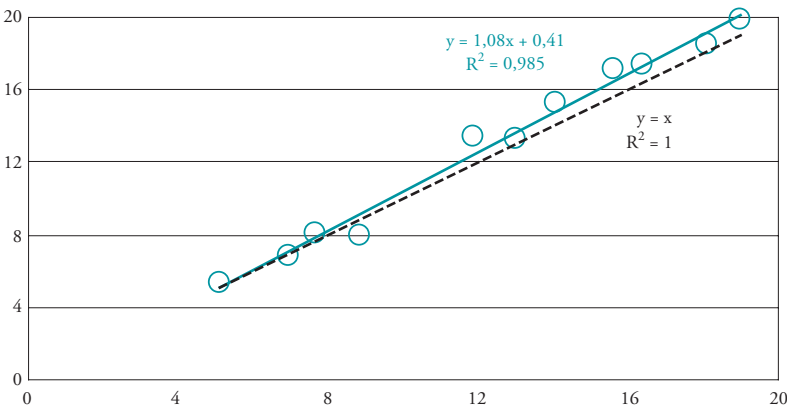
En estudios en el sureste peninsular, el reflectómetro se ha utilizado para medir la concentración de NO_3^- en (a) soluciones nutritivas (Gráfico 4), (b) solución del suelo (Gráfico 5), y (c), savia (Gráfico 6) y para cada solución se compararon los resultados de cada análisis con los resultados de un laboratorio analítico. En cada una de las tres soluciones, el reflectómetro proporcionó medidas adecuada de la concentración de NO_3^- en comparación con el laboratorio.

Gráfico 4. En solución nutritiva; comparación entre la concentración de NO_3^- medida con el RQFlex Reflectoquant y en un laboratorio analítico. En $\text{mmol NO}_3^- \text{ L}^{-1}$



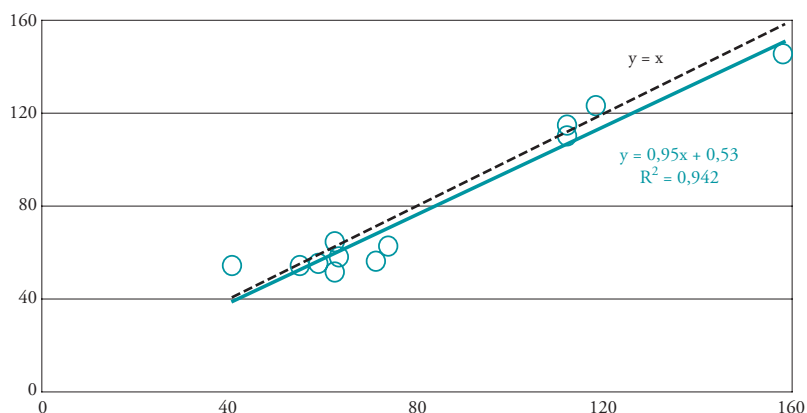
* Se presenta la línea 1:1 ($y=x$) para comparar.

Gráfico 5. En solución de suelo; comparación entre la concentración de NO_3^- medida con el RQFlex Reflectoquant y en un laboratorio analítico. En $\text{mmol NO}_3^- \text{ L}^{-1}$



* Se presenta la línea 1:1 ($y=x$) para comparar.

Gráfico 6. En savia de planta; comparación entre la concentración de NO_3^- medida con el RQFlex Reflectoquant y en un laboratorio analítico. En $\text{mmol NO}_3^- \text{ L}^{-1}$



* Se presenta la línea 1:1 ($y=x$) para comparar.

Sistema Clean Grow

El sistema Clean Grow, también conocido como Nutrient Analyzer, es un nuevo sistema de electrodos selectivos de iones que utiliza nanotecnología. En apariencia y tamaño (Figura 6), es similar a los equipos portátiles que miden la conductividad eléctrica (CE) de soluciones. Hay varios modelos del sistema Clean Grow para el análisis de distintos iones. Hay un modelo que analiza solo NO_3^- y otro que analiza NH_4^+ (Tabla 1). Hay un modelo que analiza seis de NO_3^- , NH_4^+ , Ca^{2+} , Cl^- , K^+ , Na^+ o Mg^{2+} ; todos son iones diferentes de interés en agricultura. Para la medida de NO_3^- , el rango de concentración es 0,01 a 970 mmol L^{-1} , y para NH_4^+ es 0,03 a 500 mmol L^{-1} . Estos rangos de concentración cubren todas las aplicaciones hortícolas, incluyendo el rango completo de NO_3^- en savia. Para NO_3^- y NH_4^+ , el tiempo de medida es menos de un minuto. Hay más información sobre este equipo en los Anexos 1 y 2 de este artículo.

El sistema Clean Grow se vende como un kit que incluye varios accesorios, soluciones de calibración y un estuche para transportarlo todo. Al ser un equipo recientemente puesto en el mercado no existe mucha información contrastada sobre el mismo.

La empresa española Nsensors, SL tiene un sensor similar al sistema Clean Grow, el Multi ION sensor, que se puede configurar para analizar desde

2 hasta 6 iones con una sonda. El el Multi ION sensor puede analizar NO_3^- , NH_4^+ , Ca^{2+} , Cl^- , K^+ , Mg^{2+} , entre otros iones.

Figura 6. Sistema Clean Grow



5. Observaciones sobre el uso de los equipos

En general, el LAQUAtwin y el RQ Flex Reflectoquant tienen una buena exactitud para medir NO_3^- en soluciones nutritivas, solución del suelo y savia (Gráficos 1-6). Durante los últimos 20 años, el LAQUAtwin y el RQ Flex Reflectoquant se han usado bastante en horticultura y agricultura, y los resultados publicados en la bibliografía científica internacional son generalmente consistentes con los resultados obtenidos en el sureste español y presentados en este capítulo.

Para el análisis de la solución nutritiva, solución del suelo y savia utilizando el RQ Flex Reflectoquant, generalmente es necesario diluir las muestras para que estén dentro del rango analítico del instrumento. Las muestras de solución nutritiva y de solución del suelo, no requieren dilución con el LAQUAtwin, sin embargo, en algunas muestras de savia es necesaria la dilución. La dilución aumenta el tiempo necesario para llevar a cabo el análisis y se debe hacer con cuidado pues imprecisiones en este proceso pueden alterar bastante el valor de la medida restando confianza al resultado.

Con equipos de electrodos selectivos como el LAQUAtwin y el sistema Clean Grow hay posibilidades de interferencias con otros iones que pueden afectar la exactitud de las medidas. Las situaciones más problemáticas son concentraciones elevadas de aniones como cloruro, bromuro y de algunos compuestos orgánicos. Cuando hay posibilidades de que haya interferencias es aconsejable comprobar los resultados de estos equipos con un laboratorio de análisis.

6. Consejos generales

Los sistemas de análisis rápidos como muchos equipos analíticos están afectados por la temperatura. Por eso es recomendable hacer los análisis en temperaturas en torno a 20 °C y evitar temperaturas extremas. La luz directa puede influir en los equipos, particularmente los equipos como el RQ Flex Reflectoquant que miden intensidad de color; por tanto es recomendable evitar medidas al aire libre y donde hay luz directa. Para minimizar los efectos de las condiciones ambientales sobre los equipos, se recomienda hacer siempre los análisis en condiciones similares durante el seguimiento de un cultivo.

Mientras que estos equipos de análisis rápido son adecuados para su uso en la finca, es necesario tener en cuenta que son equipos científicos y es necesario que se traten con cuidado. Es importante entender que no son herramientas de bricolaje. Para optimizar su exactitud, es aconsejable mantener los equipos calibrados y limpios siguiendo las recomendaciones de los fabricantes.

Estos equipos sirven para dar una buena idea de las concentraciones de NO_3^- en las soluciones de interés. Pero, sus resultados son menos exactos que los de un laboratorio analítico. Es aconsejable comprobar periódicamente los resultados con los análisis de un laboratorio analítico.

7. Ejemplos de seguimiento de cultivos en Almería

En un estudio realizado por la Universidad de Almería con un cultivo de tomate en un invernadero comercial en La Cañada, Almería, se realizaron medidas cada dos semanas de la concentración de NO_3^- en la solución del suelo y en savia de los peciolo con el RQ Flex Reflectoquant y en un laboratorio analítico. Los resultados para la solución del suelo se presentan en el Gráfico 7 y para savia en el Gráfico 8.

Gráfico 7. Concentración de NO_3^- en la solución de suelo durante un cultivo de tomate en un invernadero comercial. La concentración de NO_3^- se midió con el RQ Flex Reflectoquant y en laboratorio. En $\text{mmol NO}_3^- \text{ L}^{-1}$

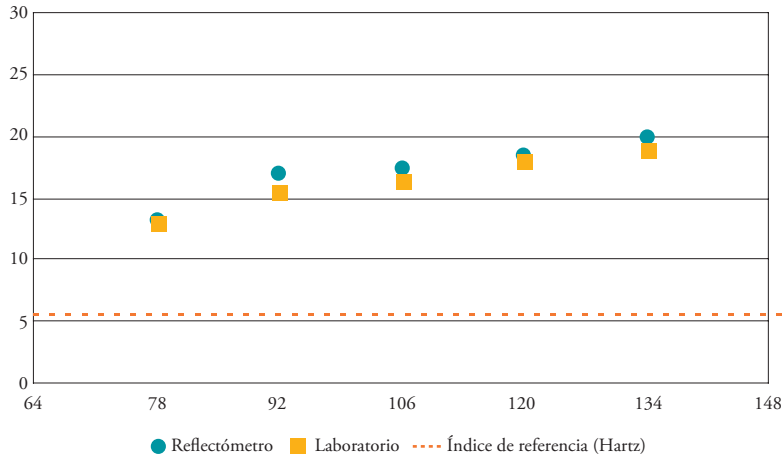
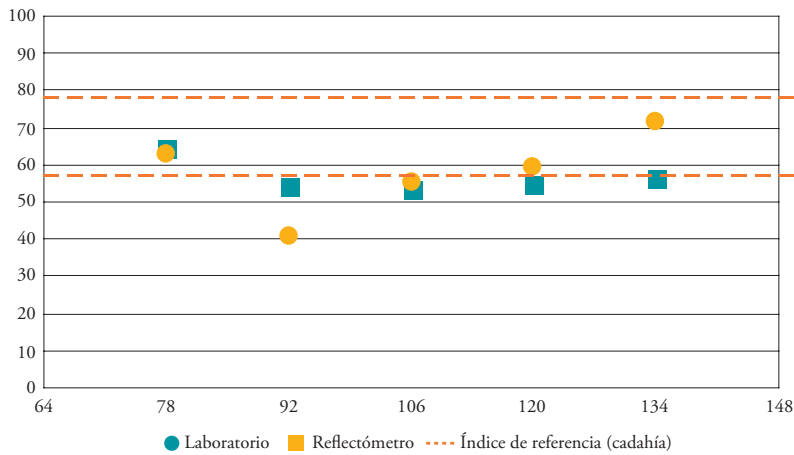


Gráfico 8. Concentración de NO_3^- en la savia de peciolo durante un cultivo de tomate en un invernadero comercial. La concentración de NO_3^- se midió con el RQ Flex Reflectoquant y en laboratorio. En $\text{mmol NO}_3^- \text{ L}^{-1}$



En este estudio, el RQ Flex Reflectoquant proporcionó resultados muy similares a los del laboratorio durante todo el cultivo, de concentración de NO_3^- en la solución del suelo (Gráfico 7) y en savia (Gráfico 8). Estos resul-

tados demuestran que el sistema de análisis rápido proporcionó información al agricultor muy similar a la del laboratorio. En este ejemplo, los resultados del análisis de NO_3^- en la solución del suelo sugieren que la aplicación de N durante todo el cultivo era excesiva y que se podría haber aplicado menos N.

8. Protocolos para el uso del análisis rápido de nitrato en la solución del suelo

La Estación Experimental de Cajamar elaboró un manual sobre el uso de las sondas de succión para ayudar con la gestión del nitrógeno en cultivos hortícolas en el sureste peninsular, titulado «Reducción de la lixiviación de nitratos y manejo mejorado de nitrógeno con sondas de succión en cultivos hortícolas» (Granados *et al.*, 2008). Este manual describe resultados experimentales y contiene protocolos detallados de la instalación y uso de las sondas de succión y su aplicación para controlar la concentración de NO_3^- de la solución del suelo. La portada se reproduce a continuación (Figura 7). Esta publicación se puede obtener en la página web de la Estación Experimental Cajamar: <http://www.publicacionescajamar.es/pdf/series-tematicas/centros-experimentales-las-palmerillas/reduccion-de-la-lixivacion-de-nitratos.pdf>.

IFAPA-La Mojonera preparó un protocolo sobre el uso de las sondas de succión en combinación con sistemas de análisis rápidos para controlar la concentración de NO_3^- en la solución del suelo. El título de este documento es «Protocolo de actuación para disminuir la contaminación por nitratos en cultivos de pimiento y tomate bajo abrigo». Este documento describe la legislación vigente, resultados experimentales y procedimientos para el uso de sondas de succión y del RQ Flex Reflectoquant y del LAQUAtwin. La portada se reproduce a continuación (Figura 7). Este protocolo se puede obtener en la página web de SERVIFAPA en: <http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/servifapa/contenidoAlf?id=da076140-e700-4166-8d69-74bed98e86de>.

Figura 7. Manual de Granados *et al.* publicado por la Estación Experimental Cajamar (izda.) y portada del protocolo preparado por IFAPA-La Mojonera (dcha.)



9. Programa piloto para introducir sondas de succión y sistemas de análisis rápido a la comunidad agrícola en Almería

Desde octubre de 2011, el IFAPA-La Mojonera ha estado trabajando con técnicos de diez cooperativas importantes de las provincias de Almería y Granada para introducir el uso combinado de la sondas de succión y análisis rápido de NO_3^- en campo. Las cooperativas que han participado son: Murgiverde, Frutas Escobi, Naturechoice, Canalex, Casur, Casi, Coprohníjar, Vicasol, Horticueltas y Granada La Palma. Cada cooperativa ha recibido diez sondas de succión tipo «pelos radicales», tubos de vacío y un LAQUAtwin y se está haciendo el seguimiento de las concentraciones de NO_3^- en varios cultivos de pimiento y de tomate.

La experiencia de los técnicos con estos equipos está siendo bastante positiva. Su uso es fácil y permite tomar decisiones de manera rápida y fiable haciendo un seguimiento continuo de la evolución del contenido de NO_3^- en la solución nutritiva y en la solución de suelo. Los resultados preliminares permiten afirmar que se están ajustando de una manera bastante racional las cantidades de N aportadas en las fincas en las que se está haciendo el seguimiento, ya que los valores de NO_3^- que se están obteniendo (entre 2 y 10 mmol L^{-1}) son inferiores a los hipotéticamente previstos.

Referencias bibliográficas

- BURT, C.; O'CONNOR, K. O. y RUEHR, T. (1995): «Fertigation»; *Irrigation Training and Research Center*. EEUU, California Polytechnic State University.
- CADAHIA LÓPEZ, C. (2008): *La savia como índice de fertilización*. Madrid, Mundi-Prensa.
- FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ, M. M.; BAEZA CANO, R.; CÁNOVAS FERNÁNDEZ, G. y MARTÍN EXPÓSITO, E. (2011): *Protocolo de actuación para disminuir la contaminación por nitratos en cultivos de pimiento y tomate bajo abrigo*. Andalucía, IFAPA.
- GRANADOS GARCÍA, M. R.; THOMPSON, R. B.; FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ, M. D. y GALLARDO, M. (2016): «Manejo mejorado del riego y la fertilización mediante sondas de succión y tensiómetros en cultivos intensivos»; *Mejora en la eficiencia del uso de Agua y Fertilizantes en Agricultura*. Almería, Cajamar Caja Rural.
- GRANADOS GARCÍA, M. R. (2011): «Lixiviación de nitratos desde cultivos de invernadero en suelo en las condiciones de Almería: magnitud, factores determinantes y desarrollo de un sistema de manejo optimizado»; *Tesis doctoral*. Almería, Universidad de Almería.
- GRANADOS GARCÍA, M. R.; THOMPSON, R. B.; FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ, M. D.; GALLARDO, M. y GÁZQUEZ GARRIDO, J. C. (2005): «Uso de sondas de succión para el manejo de la fertilización nitrogenada en un cultivo de tomate bajo condiciones de invernadero»; en RAMOS, C. *et al.*, ed.: *Sistemas de recomendación de abonado*. Sociedad Española de Ciencias Hortícolas; pp. 79-85.
- GRANADOS GARCÍA, M. R.; THOMPSON, R. B.; FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ, M. D.; GÁZQUEZ GARRIDO, J. C.; GALLARDO, M. y MARTÍNEZ GAITÁN, C. (2008): *Reducción de la lixiviación de nitratos y manejo mejorado de nitrógeno con sondas de succión en cultivos hortícolas*. Almería, Cajamar Caja Rural.
- HARTZ, T. K. y HOCHMUTH, G. J. (1996): «Fertility management of drip-irrigated vegetables»; *HortTechnology* (6); pp. 168-172.

HOCHMUTH, G. (2015): *Plant petiole sap-testing for vegetable crops*. CR144/CV004, IFAS Extension, University of Florida. <http://edis.ifas.ufl.edu/cv004>.

LAO, M. T. (2016): «Uso de sondas de succión para el manejo del fertirriego en horticultura intensiva»; *Mejora en la eficiencia del uso de Agua y Fertilizantes en Agricultura*. Almería, Estación Experimental Cajamar.

Anexo 1. Proveedores de sistemas de análisis rápidos, sondas de succión y material para hacer diluciones

Tabla 2. Proveedores de sistemas de análisis rápidos

Sistema de análisis	Proveedores locales
RQFlex Reflectoquant	DICSA, Vícar
LAQUAtwin	DICSA, Vícar
Nutrient Analyzer	Pelemix, Alhama de Murcia, Murcia (distribuidor local)
Multi ION	Nt Sensors

Tabla 3. Proveedores de sondas de succión en la zona de Almería

Material	Modelo	Proveedor local en Almería
Sondas de succión	Irrometer	DICSA, Vícar,
Sondas de succión	Modificación de Irrometer	HIMARCAN, Santa María del Águila
Sondas de succión	Pelos radicales	DICSA, Vícar

Tabla 4. Proveedores de material para hacer diluciones

Sistema de análisis	Proveedores locales
Matraz aforado	DICSA, Vícar
Pipeta	DICSA, Vícar

Anexo 2. Fuentes de más información sobre los sistemas de análisis rápidos y otro material relevante

Tabla 5. Páginas webs con información adicional sobre los sistemas de análisis rápidos y las sondas de succión

Equipo	Empresa	Página web
<i>Sistemas de análisis rápidos</i>		
RQFlex Reflectoquant	Merck (fabricante)	http://www.merckmillipore.com/ES/es/product/Reflect%C3%B3metro.MDA_CHEM-116970
RQFlex Reflectoquant, y LAQUArwin	DICSA (distribuidor local)	http://www.dicsa.es
LAQUArwin	Spectrum Technologies (distribuidor internacional)	http://www.specmeters.com/nutrient-management/nutrient-meters/ (en inglés)
LAQUArwin	COPERSA (distribuidor nacional)	http://www.copersa.com/es/catalogo/
Nutrient Analyzer	Clean Grow, Irlanda (fabricante)	http://www.cleangrow.com (en inglés)
Multi ION	NT Sensors, Catalonia (fabricante)	http://www.ntsensors.com
<i>Sondas de succión</i>		
Sonda Irrometer	Irrometer (fabricante)	http://www.irrometer.com/defaultsp.htm
Sonda Irrometer (modificada)	Himarcan (distribuidor local)	http://www.himarcan.com
Sonda «pelo radical»	Rhizosphere Products (fabricante)	http://www.rhizosphere.com/rhizons (en Inglés)

Patrones de humectación y distribución de sales en los suelos de los invernaderos

Fernando del Moral Torres

Universidad de Almería

1. Introducción y objetivos

La Real Academia de la Lengua Española define el concepto de eficiencia como la capacidad de disponer de alguien o de algo para conseguir un efecto determinado. En esta definición subyace por una parte el concepto de empleo de recursos para obtener un resultado concreto y, por otra, la posibilidad de establecer comparaciones, en el sentido de más eficiente o menos eficiente en función de la relación entre los recursos empleados y los resultados obtenidos.

La eficiencia de un sistema se puede analizar desde diferentes perspectivas: desde una perspectiva económica, los recursos utilizados suponen un coste (directo o indirecto) mientras que los resultados obtenidos suponen ingresos, de cuyo balance depende el resultado final (beneficio/pérdidas); pero en la actividad agrícola que nos ocupa existen otras facetas que también pueden ser analizadas en un contexto de costes/ingresos y que repercuten en beneficios agronómicos ambientales o sociales, aspectos cada vez más demandados en nuestro entorno político y cultural y de los que depende que podamos mantener la actividad a largo plazo. Por lo tanto, cuando hablamos de un manejo eficiente de nuestro sistema debemos contemplar, a la vez, economía, agronomía, medioambiente y sociedad.

Volviendo a la perspectiva económica, nuestro actual modelo agrícola no nos permite conocer a priori cuál será el precio de venta del producto, con lo cual no es fácil realizar una predicción fiable de los ingresos que vamos a obtener. Sin embargo sí conocemos cuál es el precio de los recursos que vamos a utilizar, lo que significa que la reducción de costes de cultivo, maximizando la eficiencia en el uso de los recursos para mantener los rendimientos productivos, es la única manera segura de garantizar un incremento de los beneficios al final de la campaña.

Pero el incremento de la eficiencia en cualquier proceso productivo solo se puede conseguir a partir de un conocimiento profundo del sistema y de un diagnóstico preciso de los factores limitantes susceptibles de mejorarse a bajo coste. En sistemas agrícolas como el nuestro, en los que la disponibilidad de agua es reducida y en el que los aportes y el comportamiento de los fertilizantes (orgánicos e inorgánicos) están íntimamente ligados a este elemento (Sánchez-Martín *et al.*, 2008, Huang *et al.*, 2008), comprender con claridad (i) el movimiento y distribución de la humedad en el suelo y los factores de los que depende, y (ii) el comportamiento de los nutrientes en el suelo y los factores relacionados con el desarrollo radicular, que permite a la planta aprovechar los recursos aportados, es de importancia capital para poder hacer un uso altamente eficiente del mismo.

El sector hortícola almeriense está muy influido por un factor cultural que homogeniza la forma de «construcción» de los suelos y el tipo de instalaciones de riego utilizadas (incluido tipo y caudal de los emisores) sin que se realicen habitualmente estudios previos de idoneidad, lo que en muchos casos afecta a la eficiencia de los sistemas cuando no desemboca en graves problemas. El manejo diferencial tratará de hacerse una vez detectados los problemas, cuando el margen de maniobra es relativamente pequeño. Con este trabajo pretendo poner de manifiesto el enorme impacto que tiene la correcta elección del tipo de arena utilizada en función del tipo de suelo aportado, sobre la futura eficiencia en la gestión de los recursos, principalmente del agua y de los nutrientes y en la prevención de problemas de encharcamiento o salinización.

2. Conociendo el sistema: fundamentos teóricos

Movimiento del agua en el suelo. Infiltración. Suelos organizados en capas. Redistribución

El agua en el suelo se mueve en respuesta a un gradiente de potencial hídrico, es decir, según la diferencia en el estado energético del agua entre dos puntos considerados, de tal modo que siempre se moverá desde el punto en que presenta mayor energía hacia el que presenta menor energía. Tal como lo define la ley de Darcy, la densidad de flujo de agua (q = flujo de agua por unidad de superficie) es proporcional al gradiente de potencial hídrico ($\partial\phi/\partial x$ =gradiente de potencial hídrico en la dirección espacial x), según la siguiente fórmula:

$$q = K\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial y} + \frac{\partial \phi}{\partial z}\right)$$

siendo la conductividad hidráulica del suelo (K) el factor de proporcionalidad. En suelos saturados K es constante (K_s), al menos mientras la estructura del suelo permanezca estable, y el gradiente de potencial se corresponde fundamentalmente con la presión hidrostática (potencial de presión). Valores típicos de K_s son 1 a 10 m día⁻¹ en suelos arenosos hasta 10⁻⁴ a 10⁻¹ m día⁻¹ en suelos arcillosos. Sin embargo, en suelos no saturados, esta constante de proporcionalidad varía en función del contenido de agua, descendiendo rápidamente conforme lo hace la humedad del suelo¹. En este caso, el gradiente de potencial puede considerarse como la suma de dos componentes, uno, el gradiente de potencial matricial, derivado de la energía con la que el agua está retenida por la matriz del suelo y que depende del diámetro del poro y de la naturaleza de la superficie de sus paredes², y otro, el gradiente de potencial gravitatorio, derivado de la posición en el campo gravitatorio terrestre.

Definimos infiltración como la entrada de agua en el suelo a través de su superficie (Kutílek y Nielsen, 1994). El patrón de distribución de humedad en torno a un gotero durante el proceso de infiltración depende de (i) el caudal emisor del gotero, (ii) el tiempo de emisión, (iii) de la configuración de los emisores³ (iv) las condiciones iniciales de entorno al comenzar el riego (historial de riegos) (v) las propiedades físicas del suelo y su distribución espacial y (vi) la actividad de las raíces (Schwartzman y Zur, 1986; Schwankl y Hanson, 2007; Elmaloglou y Diamantopoulos, 2009). La cantidad de agua por unidad de superficie (densidad de flujo) que atraviesa una superficie determinada variará en función del tiempo que el suelo está recibiendo agua, hasta alcanzar un estado de equilibrio a partir del cual dicha densidad de flujo ya no varía⁴.

Podemos distinguir dos casos:

¹ A la relación entre el contenido de humedad de un suelo y el potencial hídrico, se le denomina curva característica de humedad del suelo. Como su nombre indica es propia de cada suelo, aunque presenta dos formas en función de que el suelo esté en fase de humectación o de secado. A este efecto se le denomina histéresis y provoca que, para un mismo potencial hídrico, el contenido de humedad sea mayor si el suelo está en fase de secado que si está en fase de humectación.

² Podemos asociar este potencial con el fenómeno de capilaridad por todos conocido. Los poros del suelo con mayor diámetro de manera general presentan potenciales matriciales mayores (menos negativos) que los poros con menor diámetro, lo que significa que el agua pasará espontáneamente desde los poros de mayor diámetro a los de menor diámetro, pero no al revés. Dicho de otro modo, los poros de menor diámetro tienen mayor capacidad de succión del agua y es necesaria mayor energía para retirarla que los poros de mayor diámetro.

³ Si están en superficie o son subsuperficiales, o si se trata de un gotero puntual o una cinta de exudación.

⁴ En caso de aporte constante y continuo de agua.

- i) Si la cantidad de agua aportada supera la capacidad de infiltración del suelo, definida por su conductividad hidráulica en saturación (K_s), al cabo de un cierto tiempo el suelo aparecerá inundado. El espesor de la lámina de agua que cubre el suelo, en caso de no poder ser evacuada, será tanto mayor cuanto mayor sea el tiempo que duren estas condiciones de aporte de agua. En caso de un riego por goteo, en el que el aporte de agua es puntual, en vez de producirse un incremento en la altura de la lámina de agua que cubre el suelo, se produce un incremento de la superficie de infiltración hasta alcanzar una situación de equilibrio entre la capacidad total de infiltración de dicha superficie y el caudal de agua aportado. El suelo, en el entorno del emisor estará en condiciones de saturación y el potencial hídrico en la zona humectada será muy elevado.
- ii) Si, por el contrario, la cantidad de agua aportada es inferior a la capacidad de infiltración del suelo, no se producirá encharcamiento y el valor de la humedad del suelo estará por debajo del valor de saturación. La velocidad de infiltración dependerá de la conductividad hidráulica del suelo que, como se indicó más arriba, es función de las condiciones de humedad alcanzadas. En riego por goteo, la superficie mojada será mínima, y el suelo no alcanzará las condiciones de saturación en el entorno del emisor.

En suelos dispuestos en capas, con límites abruptos entre ellas, tal como ocurre en el caso de los suelos arenados almerienses, cuando el frente de humectación pasa a través de la interface entre dos capas con diferente textura, el cambio brusco de propiedades hidráulicas tiene como consecuencia un ajuste de las condiciones de flujo, hasta que se alcance una nueva situación de equilibrio (Chu y Mariño, 2005). Plantearemos de nuevo dos casos diferentes:

1. Caso simple de suelo con dos capas, la superior de textura más fina que la inferior⁵. Dado que el diámetro de los poros en la capa superior es más pequeño que el de los poros en la capa inferior, para un contenido de humedad dado, el potencial matricial promedio en la capa superior será más negativo que en la capa inferior. En este caso, aunque la capa subyacente arenosa sea, a priori, más permeable, se

⁵ Es decir, la conductividad hidráulica en saturación (K_s) de la capa superior (K_{s1}) es mucho más baja que la de la capa inferior (K_{s2}). Sería el caso de un suelo franco arcilloso, franco limoso o más fino sobre un suelo franco arenoso, arenoso o más grueso.

comportará como una capa parcialmente impermeable, al menos hasta que el incremento de humedad en la interface sea lo suficientemente elevado como para que la diferencia de potenciales entre ambas capas se iguale y se pueda producir el paso de agua (Li *et al.*, 2007). Si la diferencia de diámetros entre los poros de ambas capas es muy acusada, será incluso necesario que gran parte de la capa superior esté completamente saturada para que se pueda producir dicho paso de agua. Aún así, el avance del frente de humectación dejará de ser homogéneo y avanzará primero a través de los poros más finos de la capa inferior, dando lugar a una forma de flujo preferencial con aspecto de dedos. Como la capa superior del suelo solo es capaz de proporcionar agua a una velocidad muy lenta (determinada por su K_s), menor de la que es capaz de evacuar el horizonte inferior, el flujo preferencial suele mantenerse y los «dedos» de humedad se alargan verticalmente en el horizonte subyacente⁶.

2. El segundo caso es el contrario, una capa superior de textura gruesa con una elevada conductividad hidráulica en saturación (K_{s1}), que se sitúa sobre una capa inferior de textura más fina con baja conductividad hidráulica (K_{s2}), tal como ocurre en los invernaderos arenados. En este caso, en la interface entre ambas capas se producirá una zona saturada, con agua libre, cuya altura depende del caudal de entrada de agua y de la relación K_{s1}/K_{s2} (Kutílek y Nielsen, 1994). Si el aporte de agua es puntual, como ocurre con el riego por goteo, en vez de producirse un incremento en la altura de la lámina de agua en la interface, se producirá un incremento de la superficie de infiltración hasta alcanzar una situación de equilibrio entre la capacidad de infiltración total a través dicha superficie y el caudal de agua aportado, encontrándose la capa inferior, en el entorno del gotero, en condiciones de saturación⁷ (Li *et al.*, 2004).

⁶ Este efecto suele aparecer en determinados invernaderos en los que se ha aportado un sustrato de textura fina sobre desmontes, nivelaciones o suelos naturales de textura más gruesa y posteriormente se ha enarenado. Los problemas de encharcamiento suelen observarse bien entrada la campaña, una vez el sustrato aportado ha llegado a saturarse completamente, o en las zonas topográficamente más bajas del invernadero, como consecuencia de que el agua no se puede evacuar en profundidad o lo hace demasiado lentamente.

⁷ Si el contraste textural es demasiado abrupto, el caudal de emisión del gotero es elevado y la distancia entre goteros o líneas no es la adecuada, podemos observar la unión de superficies de infiltración. En estos casos, la capa inferior se encontrará a menudo en condiciones de saturación y falta de oxígeno (anoxia), dependiendo de la frecuencia de riegos.

3. Redistribución del agua del suelo tras la infiltración

Cuando la infiltración cesa, la superficie del suelo (o el entorno del emisor en el caso de riego por goteo) estará en estado de saturación o muy próximo a ella, lo que significa que el potencial hídrico será elevado y se mantendrá así a lo largo de toda la zona comprendida dentro del frente de humectación. Sin embargo, fuera de esta zona, el potencial hídrico será menor, por lo que el agua tenderá a moverse hacia estas zonas más secas, formando un nuevo frente de humectación. A este proceso se le conoce como redistribución del agua del suelo. Durante el mismo, el contenido de agua en el frente humectado original desciende, a la vez que se incrementa el contenido de humedad del entorno a un ritmo que depende de la conductividad hidráulica del suelo y del gradiente de potencial, siendo por tanto más lento en suelos de textura fina que en suelos de textura gruesa. Si el contenido de humedad en el frente de humectación era muy elevado, el potencial gravitacional jugará un papel importante en el proceso de redistribución del agua del suelo.

Conforme avanza el proceso de redistribución, la densidad de flujo a lo largo del frente de redistribución va disminuyendo debido a que el gradiente de potencial disminuye (los contenidos de humedad van homogeneizándose) y la conductividad hidráulica en la parte inicialmente húmeda desciende de manera pronunciada como consecuencia de la disminución del contenido en humedad. Por otro lado, hay que destacar que, como el proceso de redistribución comprende una fase de desecación desde el frente de humectación original y una fase de humedecimiento fuera de esta zona, el proceso total estará fuertemente influido por la histéresis, de tal modo que, para un mismo potencial hídrico, el contenido de humedad en la zona original que se está secando será mayor que en la zona que se está humectando.

Cuando el perfil del suelo está organizado en capas, el proceso de redistribución es similar al descrito antes para el proceso de infiltración. Si existe una capa de textura gruesa situada bajo una de textura fina, la redistribución en profundidad puede verse muy ralentizada e incluso impedida hasta que el potencial hídrico en la interface esté muy próximo a cero o incluso adopte valores positivos (condiciones de saturación con presión hidrostática como consecuencia del peso de la columna de agua libre por encima de la interface). Solo en este caso, los poros de diámetro mayor de la capa inferior serán capaces de llenarse de agua. Ahora bien, si el estado de humedad original de la

capa inferior era próximo a saturación antes del proceso de redistribución, entonces esta capa de textura gruesa podría facilitar el proceso de redistribución.

En caso contrario, si tenemos una capa de textura gruesa situada sobre otra de textura fina, está última ralentizará el proceso de redistribución, originando una inundación por encima de la interface.

La importancia práctica del proceso de redistribución de agua en el suelo es raramente apreciada en su totalidad (Kutílek y Nielsen, 1994). Puesto que el tiempo que dura el proceso de redistribución es mucho más largo que el que dura el proceso de infiltración, la redistribución del agua en el suelo juega un papel determinante en la capacidad de almacenamiento de agua y en la disponibilidad de esta para las plantas⁸. Además, junto con los procesos de evapotranspiración, determinará las condiciones iniciales para que ocurra el siguiente proceso de infiltración, condicionando también la distribución de sales solubles a lo largo del perfil del suelo.

4. Movimiento de agua desde el suelo hacia la raíz y a través de esta

El paso de agua desde el suelo hacia la raíz también dependerá del gradiente de potencial establecido. El flujo de agua dentro de la raíz puede ocurrir bien a través de las paredes celulares (vía apoplástica), en cuyo caso el flujo estará determinado fundamentalmente por el gradiente de potencial matricial establecido entre la matriz del suelo y la pared celular, o bien atravesando la célula, a través de plasmodesmos o conexiones entre dos células adyacentes (vía simplástica) o mediante flujo transcelular, caso este último en el que el agua debe atravesar la membrana plasmática semipermeable⁹ (Gregory, 2006; Waisel *et al.*, 2002), en cuyo caso cobra gran importancia un nuevo componente de potencial, denominado potencial osmótico, que depende de la concentración salina a ambos lados de la membrana semipermeable y que fuerza el paso de agua desde la solución más diluida a la más concentrada. Cuanto mayor sea la concentración salina de la solución del suelo, menor será el gradiente de potencial osmótico a través de la membrana celular y más «difícil» será el paso de agua al interior de la célula. Para evitar esto y mante-

⁸ De esto se desprende que la capacidad de campo de un suelo se consigue tras la estabilización del proceso de redistribución, por lo tanto, al depender de las características hidráulicas del propio suelo, no es igual para todos los casos.

⁹ La permeabilidad de las membranas pueden alterarse drásticamente como consecuencia de cambios en la estructura de canales proteínicos de agua denominados aquaporinas presentes en dichas membranas plasmáticas (Javot and Maurel, 2002), pero su comportamiento no entra en el alcance de este trabajo.

ner los gradientes de potencial osmótico, la célula se ve forzada a incrementar su contenido en sustancias solubles, lo que, generalmente, supone un coste energético para el vegetal.

5. Eficiencia en la captación de agua y nutrientes: el sistema radicular

La demanda de nutrientes desde el suelo depende de la demanda metabólica de la planta y esta ejerce un considerable, pero no absoluto, control sobre las cantidades de iones que van a entrar en ella (Gregory, 2006). De manera general todas las plantas van a necesitar los mismos nutrientes, con variaciones menores.

Las raíces de las plantas están en contacto directo con un volumen relativamente pequeño de la solución del suelo, por lo tanto, debemos conocer los mecanismos que permiten el movimiento de los nutrientes desde el suelo hacia la superficie de la raíz. Estos procesos son fundamentalmente flujo de masas y difusión. El primero es un flujo convectivo como resultado del proceso de transpiración. Los nutrientes disueltos en el agua se mueven con esta hacia la planta en el continuo hidráulico formado por suelo-planta-atmósfera, a favor del gradiente de potencial hídrico. Puesto que la planta es selectiva en cuanto al flujo de nutrientes a través de las membranas, este flujo de masas genera gradientes de concentración de nutrientes de distinta intensidad y dirección en torno a la superficie de la raíz, lo que da lugar al proceso de difusión¹⁰. Si un nutriente es absorbido a mayor velocidad de la que es transportado mediante flujo de masas, la concentración en el entorno radicular será muy baja y el nutriente tenderá a moverse por difusión desde el suelo hacia la raíz, generándose en torno a esta una zona de agotamiento (caso del fósforo y del potasio) (Fitter y Hay, 1983). Si por el contrario, la absorción del ión es lenta en comparación con la velocidad de aporte (caso del calcio en nuestros suelos y a veces del magnesio) o es selectivamente excluido (como puede ocurrir con sodio o cloruros), la concentración en el entorno radicular será alta y el ión tenderá a difundir hacia el suelo (Tinker y Nye, 2000).

El que un nutriente pueda ser proporcionado a la velocidad adecuada, considerando una raíz individual, depende de la diferente movilidad de los

¹⁰ Difusión: proceso por el cual los iones en solución tienden a moverse desde zonas de alta concentración a zonas de baja concentración.

iones en el suelo¹¹, lo que a su vez condiciona el volumen influenciado por dicha raíz, siendo este volumen mayor si la movilidad del ión es alta, como por ejemplo ocurre en el caso del nitrógeno, y menor si la movilidad del nutriente en solución es escasa (caso del fósforo). Dicho de otro modo, si la movilidad es escasa, es necesario un mayor volumen radicular que explore un mayor volumen de suelo para que el abastecimiento del nutriente sea suficiente para responder a las necesidades metabólicas del vegetal.

Por tanto, los nutrientes y el agua se extraen del suelo más eficientemente y con mayor ventaja competitiva si los órganos de absorción están situados en contacto íntimo con los poros en los que reside la humedad del suelo, con las superficies de intercambio iónico y con regiones de elevada vida microbiana, siempre y cuando su actividad no esté restringida ni espacial ni temporalmente, es decir, siempre y cuando exista la posibilidad de que las raíces puedan explorar un volumen adecuado de suelo (de Kroon y Visser, 2003).

6. ¿Qué características del suelo están relacionadas con la elongación del sistema radicular?

La arquitectura del sistema radicular es tan variada como la de la parte aérea. Es un sistema modular en el que cualquier meristemo puede generar meristemos laterales, lo que redundará en una gran flexibilidad a la hora de desarrollarse, respondiendo a cambios en las condiciones locales (de Kroon and Visser, 2003). Nos centraremos específicamente en el medio edáfico, en el que son de importancia en la conformación del sistema radicular los siguientes factores:

- *Temperatura*: Mediatiza la velocidad a la que ocurrirán determinados procesos metabólicos. Al igual que ocurre con la elongación del tallo, existe una temperatura mínima y máxima a partir de las cuales no se produce crecimiento y una temperatura óptima en la que el crecimiento es máximo (Gregory, 2006). Este factor también puede condicionar la orientación de crecimiento de la raíz, así como la tasa y duración de los procesos de absorción y transporte de agua y nutrientes o afectar a procesos como la nodulación en leguminosas.
- *Gradiente de potencial hídrico y aireación del suelo*: El agua es el factor que promueve la mayor plasticidad en la morfología radicular (de

¹¹ Lo que a su vez depende de las propiedades del suelo, entre ellas, pH, capacidad de intercambio catiónico, potencial redox, microbiota, características del material parental.

Kroon y Visser, 2003). El sistema radicular es muy sensible a las diferencias de potencial hídrico y tiende a crecer hacia aquellas zonas en las que el potencial hídrico es mayor (Gregory, 2006). Sin embargo, en el sistema poroso del suelo, los contenidos en agua y gases son inversamente proporcionales, de tal modo que un exceso de agua provocará un déficit de oxígeno y una acumulación nociva de anhídrido carbónico y otros gases que pueden afectar al desarrollo del sistema radicular. Con saturación temporal del suelo, el oxígeno disuelto es consumido fundamentalmente como consecuencia de la respiración radicular y microbiana. El tiempo necesario para que se produzca el agotamiento dependerá de la temperatura, que condiciona la velocidad de los procesos metabólicos, de la cantidad de biomasa capaz de consumir oxígeno y de la frecuencia y duración del estado de saturación. En el entorno inmediato de la raíz, el cambio en la concentración de oxígeno será mucho más rápido que en el suelo (Drew y Stolzy, 2002), de tal modo que no será necesario que las condiciones se tornen anaeróbicas para que el crecimiento y la funcionalidad radicular se vean comprometidos. La elongación radicular cesará cuando tanto el flujo de oxígeno como el O_2 disuelto estén próximos a cero, aunque el valor final dependerá de la temperatura.

- *Propiedades mecánicas del suelo:* La presencia de zonas compactadas en el suelo limita el desarrollo radicular por cuanto generan una fuerte resistencia a la elongación radicular y limitan el aporte de oxígeno necesario para que la raíz realice sus funciones metabólicas. El desarrollo de una buena estructura, con porosidad abundante de distintos tamaños favorece el desarrollo de la raíz. A su vez, un adecuado aporte hídrico mejora el proceso por cuanto (i) las raíces reducen la fricción con el suelo generando turgor detrás del ápice cónico de crecimiento y secretando lubricantes, por lo que la regulación del agua y los solutos que fluyen hacia el ápice de crecimiento es importante y tiene el doble objetivo de conseguir el suficiente turgor para deformar el suelo y mantener un diámetro lo suficientemente pequeño para penetrar en los poros edáficos (de Kroon y Visser, 2003) y (ii) la cohesión de las partículas del suelo y por tanto, la resistencia a la penetración, depende del contenido hídrico de este.
- *Distribución de nutrientes en el suelo:* Aunque no existe consenso acerca de cómo afecta la distribución de nutrientes en el suelo al desarro-

llo radicular de la planta, la forma de aplicación de los fertilizantes y el tiempo desde la aplicación de los mismos parecen influir en la arquitectura radicular. Sin embargo, la proliferación de raíces frente al aporte de nutrientes es relativamente lenta, sobre todo si la comparamos con la respuesta de la microbiota del suelo; es por ello que la planta compite débilmente por los nutrientes frente a los microorganismos edáficos (Hodge *et al.*, 2000).¹²

- *Salinidad:* La salinidad del suelo inhibe el crecimiento a través de un doble efecto: (i) el descenso del potencial hídrico total como consecuencia del potencial osmótico debido a la presencia de altas concentraciones de iones en solución y (ii) del efecto directo de los iones Cl⁻ y Na⁺, manifestado a nivel foliar. Si las concentraciones de estos iones son muy elevadas y la raíz no es capaz de inhibir selectivamente su absorción, ambos iones se acumularán en las hojas y, eventualmente excederán la capacidad de las células foliares de compartimentarlos en las vacuolas, con lo que ejercerán un efecto inhibitorio de la actividad enzimática celular y de las paredes celulares que conducirá a un estado de deshidratación, reducción del tamaño y eventualmente de muerte celular.
- *Interacción con la biota del suelo:* El efecto de la secreción de lubricantes que faciliten la elongación radicular, unido a la rizodeposición de material orgánico radicular provocan que el entorno inmediato de esta (rizosfera) esté densamente poblado y se desarrolle una amplia actividad biológica. Las relaciones funcionales establecidas entre el vegetal y la población microbiana que conforma la rizosfera son múltiples y van desde procesos simbióticos hasta la competencia o el parasitismo, afectando, por tanto, la arquitectura y funcionalidad del sistema radicular. A su vez, el establecimiento de estas relaciones funcionales está mediatizado por el medio edáfico, siendo la disponibilidad de agua y de oxígeno, dos de los factores que determinarán dichas relaciones.

¹² En este sentido, la asociación con micorrizas permite a la planta acceder a una cantidad de recursos de forma competitiva que, de otro modo, no serían accesibles.

Referencias bibliográficas

- CHU, X. y MARIÑO, M. A. (2005): «Determination of ponding condition and infiltration into layered soils under unsteady rainfall»; *Journal of Hydrology* (313); pp. 195-207.
- DE KROON, H. y VISSER, E. J. W. (2003): *Root Ecology*. Springer-Verlag. Berlin. Heidelberg. New York. ISBN 3-540-00185-9.
- DREW, M. C. y STOLZY, L.H. (2002): «Growth under oxygen stress»; en WAISEL, Y.; ESTHEL, A. y KAFKAFI, U., eds.: *Plant roots: The hidden half*. New York, Marcel-Dekker, 3.^a edición. ISBN 0-8247-0631-5.
- ELMALOGLU, S. y DIAMANTOPOULOS, E. (2009): «Effects of hysteresis on redistribution of soil moisture and deep percolation at continuous and pulse drip irrigation»; *Agricultural water management* (96); pp. 533-538.
- FAIRBORN, M. L. (1973): «Effect of gravel mulch on crop yield»; *Agronomy Journal* (65); pp. 925-928.
- FITTER, A. H. y HAY, R. K. M. (1983): *Environmental physiology of plants*. London, Academic Press. ISBN 0-12-257760-4.
- GILL, B. S. y JALOTA, S. K. (1996): «Evaporation from soil in relation to residue rate, mixing depth, soil texture and evaporativity»; *Soil Technology* (8); pp. 293-301.
- GREGORY, P. (2006): «Plant roots. Growth, activity and interaction with soils»; *Blackwell Publishing*. Oxford. ISBN 1-4051-1906-3.
- HODGE, A.; STEWART, J.; ROBINSON, D.; GRIFFITHS, B. S. y FITTER, A. H. (2000): «Competition between roots and soil micro-organisms for nutrients from nitrogen-rich patches of varying complexity»; *Journal of Ecology* (88); pp. 150-164.
- HUANG, Z.; XU, Z. y CHEN, C. (2008): «Effect of mulching on labile soil organic matter pools, microbial community functional diversity and nitrogen transformations in two hardwood plantations of subtropical Australia»; *Applied Soil Ecology* (40); pp. 229-239.
- JAVOT, H. y MAUREL, C. (2002): «The role of aquaporins in root water uptake»; *Annals of Botany* (90); pp. 301-313.
- JIMÉNEZ, C. C.; TEJEDOR, M.; DÍAZ, F. y RODRÍGUEZ, C. M. (2005): «Effectiveness of sand mulch in soil and water conservation in an arid region»; *Journal of Soil And Water Conservation* (60); Lanzarote; pp. 63-67.

- KUTÍLEK, M. y NIELSEN, D. R. (1994): *Soil Hydrology*. Berlín, Catena-Verlag. ISBN 3-923381-26-3.
- LI, J.; JI, H.; LI, B. y LIU, Y. (2007): «Wetting Patterns and Nitrate Distributions in Layered-Textural Soils Under Drip Irrigation»; *Agricultural Sciences in China* (6); pp. 970-980.
- LI, J.; ZHANG, J. y RAO, M. (2004): «Wetting patterns and nitrogen distributions as affected by fertigation strategies from a surface point source»; *Agricultural Water Management* (67); pp. 89-104.
- LI, X. Y. (2003): «Gravel-sand mulch for soil and water conservation in the semiarid loess region of northwest China»; *Catena* (52); pp. 105-127.
- SÁNCHEZ-MARTÍN, L.; ARCE, A.; BENITO, A.; GARCÍA-TORRES, L. y VALLEJO, A. (2008): «Influence of drip and furrow irrigation systems on nitrogen oxide emissions from a horticultural crop»; *Soil Biology and Biochemistry* (40); pp. 1698-1706.
- SCHWANKL, L. J. y HANSON, B. R. (2007): «Surface drip irrigation»; en LAMM, F. R.; AYARS, J. E. y NAKAYAMA, F. S., eds.: *Microirrigation for Crop Production* (12). Elsevier.
- SCHWARTZMAN, M. y ZUR, B. (1986): «Emitter spacing and geometry of wetted soil volume»; *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* (112); pp. 242-253.
- TINKER, P. B. y NYE, P. H. (2000): *Solute movement in the rhizosphere*. Oxford, Oxford University Press.
- WASEL, Y.; ESTHEL, A. y KAFKAFI, U. (2002): *Plant roots: The hidden half*. New York, Marcel-Dekker, 3.^a edición. ISBN 0-8247-0631-5.

Estudio de casos en suelos arenados de los invernaderos de Almería: movimiento del agua, movimiento de sales

Fernando del Moral Torres

Universidad de Almería

El acolchado inorgánico, formado con arenas y gravas de distinta granulometría, tiene la misión de reducir la evaporación y modificar el balance hídrico y térmico del suelo (Athy *et al.*, 2006; Li, 2003; González-Sousa *et al.*, 2001; Sharma *et al.*, 1998; Gill y Jalota, 1996; Fairborn, 1973). Aunque generalmente se acepta que el grosor de la capa acolchada y la granulometría de los materiales empleados afectan a los componentes de la evaporación y a la acumulación de agua en el suelo (Kemper *et al.*, 1994; Yamanaka *et al.*, 2004; Al-Harby *et al.*, 2005; Jiménez *et al.*, 2005; Yuan, *et al.*, 2008), no hay un consenso generalizado acerca de cuál debe ser el valor de estas variables para mejorar las propiedades hidráulicas de los suelos o si existe un valor común independientemente de la tipología de los suelos a los que cubren. A continuación presentaremos un estudio realizado en dos tipos de suelos comúnmente utilizados en el sureste peninsular, sobre cada uno de los cuales se dispusieron dos capas de acolchado con granulometrías distintas, dando lugar a cuatro combinaciones suelo-acolchado, en las que se estudiaron la evolución de la humedad del suelo a partir de riegos por goteo y la distribución de sales como consecuencia del proceso continuado de fertirriego.

1. Formas de medir o estimar la humedad del suelo

El contenido de agua del suelo puede medirse en campo utilizando el método gravimétrico, los métodos basados en la dispersión de neutrones o con métodos basados en las propiedades dieléctricas de la combinación suelo-agua-aire (Inoue *et al.*, 2008). En este último caso se suelen utilizar dos am-

plias categorías de sensores dieléctricos: sensores basados en reflectometría de dominios de tiempo (TDR) y sensores basados en reflectometría de dominios de frecuencia (FDR). Estos últimos, permiten estimar (Evelt y Parkin, 2005; Evelt *et al.*, 2012) el contenido volumétrico de agua en el suelo a partir de la medida de la constante dieléctrica del suelo (Noborio, 2001). Puesto que la constante dieléctrica del agua ($\epsilon = 81$) es muy superior que la de las partículas de suelo (típicamente 3-5) y la del aire ($\epsilon = 1$), la constante dieléctrica medida con un sensor de capacitancia estará determinada principalmente por su contenido en humedad (Wang y Schmugge, 1980).

2. Material y métodos

2.1. Diseño experimental

Los ensayos se llevaron a cabo en el invernadero experimental de la Universidad de Almería (36° 50'N 2° 27'W, 5 m sobre el nivel mar). Dicho invernadero fue dividido en cuatro parcelas experimentales de 25 m² cada una, con suelo artificial construido en capas: la capa más profunda, común a todas las parcelas, correspondía al suelo original de muy baja fertilidad; sobre este, en dos parcelas (P1 y P2) se aportó un sustrato procedente de cantera (S1), de textura franco arenosa y con infiltración moderada, con un espesor de 30 cm; en las otras dos parcelas (P3 y P4) se aportó un suelo franco (S2) de infiltración lenta, con el mismo espesor. Finalmente, en diseño cruzado con el anterior, se dispuso un acolchado inorgánico a base de grava (M1) en las parcelas P1 y P4, de cinco centímetros de espesor, o arena (M2) en las parcelas P2 y P3, de diez centímetros de espesor. Todas las parcelas disponían de líneas portagotos, con goteros interlínea de 3 L h⁻¹ de caudal a la presión nominal, dispuestos en un marco de 0,5 m x 1,0 m.

2.2. Análisis de suelo y acolchado

Antes de comenzar los ensayos se tomaron muestras de suelo y acolchado para su caracterización físico-química. Dichas muestras se secaron al aire y se tamizaron a 2 mm para realizar las siguientes determinaciones: pH, se midió mediante pHmetro en una suspensión suelo:agua 1:2,5. El carbono orgánico total se determinó mediante oxidación en húmedo con dicromato potásico. La capacidad de cambio catiónico fue medida mediante el método del acetato.

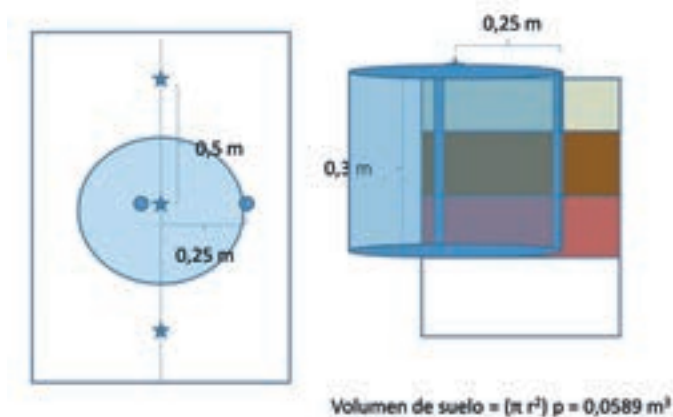
La distribución del tamaño de partículas del suelo se determinó mediante tamizado y sedimentación, aplicando el método de la pipeta de Robinson (Soil Conservation Service, 1972). La conductividad hidráulica en saturación (K_f) y el potencial de flujo matricial (ϕ_m) se midieron in situ con el permeámetro de Gelph (Reynolds y Elrick, 1985). La curva característica de humedad del acolchado y del suelo se determinaron en el laboratorio mediante membranas de presión (Soilmoisture Equipment Corp., Santa Barbara, CA, EEUU) a diferentes presiones (Richards, 1954). La densidad real se determinó mediante el método picnométrico (picnómetro de 50 mL), la densidad aparente se determinó obteniendo muestras de suelo inalteradas, de volumen conocido, a capacidad de campo. Se realizaron tres repeticiones (Blake y Hartge, 1986). La porosidad total fue calculada a partir de la densidad aparente y de la densidad real (Danielson y Sutherland, 1986). La distribución del tamaño de poros fue estimada a partir de la curva de humedad característica. El análisis mineralógico semicuantitativo se obtuvo, tras los tratamientos pertinentes, mediante un difractómetro PHILIPS, modelo X-Pert, empleando radiación $\text{CuK}\alpha$, rendija automática de divergencia y monocromador de grafito.

2.3. Humectación del suelo

Para caracterizar el patrón de humectación del suelo de cada sector, se empleó la sonda PR1 de DeltaT Devices¹ (Delta T devices, 2001), previamente calibrada mediante la sonda Theta probe ML2x. En la línea central de cada sector se colocaron dos tubos de acceso para la sonda: junto al gotero (5 cm) y a 25 cm de este en dirección perpendicular a la línea portagoteros (Figura 1). Todas las demás líneas portagoteros fueron anuladas. Tras 30 días sin recibir agua, se aportó un riego de 20 minutos de duración. En todas las parcelas experimentales, la humedad del suelo, antes, durante y después del riego, se midió a cada cinco centímetros de profundidad, mediante extracción sucesiva de la sonda, a intervalos regulares de tiempo, durante 2-3 días. Durante el período de ensayo no hubo cultivo ni vegetación sobre el suelo.

¹ La sonda PR1 profile probe (Delta-T Devices, UK) es una sonda de capacitancia de 110 cm de longitud y 2,5 cm de diámetro. Tiene seis sensores electrónicos situados a las profundidades de 10, 20, 30, 40, 60 y 100 cm desde el extremo superior. La sonda se inserta en el suelo a través de un tubo de acceso que queda instalado permanentemente en el suelo y estima el contenido de humedad en un radio efectivo de 10 cm en torno a cada sensor.

Figura 1. Esquema representativo de la colocación de los tubos de acceso para la sonda PR1. En la parte izquierda, vista de planta del experimento (las estrellas representan la posición de los goteros; los círculos oscuros, la posición de la sonda y el círculo claro de mayor diámetro, el volumen ideal muestreado). En la parte derecha, se esquematiza la distribución de horizontes artificiales del suelo, la posición de los tubos de acceso para la sonda y el volumen ideal muestreado



Tras completar el experimento, una vez tomada la última lectura con la sonda, el suelo se muestreó destructivamente para verificar la posición de cada sensor y la profundidad real de los horizontes artificiales, y se tomaron muestras volumétricas de humedad de suelo a distancias inferiores a 10 cm del tubo de acceso, utilizando anillos de 10 cm de diámetro y 5 cm de espesor en los rangos de 5-15, 15-25, 25-35, (Walker *et al.*, 2004) centrados en los sensores de la sonda, con objeto de comprobar la calibración de la sonda.

2.4. Distribución de sales en el suelo

Entre los meses de septiembre a marzo de 2008 se llevó a cabo un cultivo de tomate (*solanum lycopersicum*) cultivar Marmande Raf, en cada una de las parcelas experimentales. Todas ellas recibieron idénticas dotaciones de agua y fertilizantes orgánicos de fondo durante la campaña (Tabla 1), aunque estas variaron de acuerdo con las necesidades del cultivo. No se aplicaron fertilizantes solubles en fertirriego. Las temperaturas en el interior del invernadero estuvieron entre los 12,3 °C y los 24,8 °C, y la temperatura promedio del suelo varió entre 15,0 °C y 18,7 °C durante los ensayos.

Una vez finalizado el cultivo, se realizó un perfil de suelo (50 cm de anchura x 40 cm de profundidad), cuyo corte frontal estaba alineado con la línea portagoteros y centrado sobre el gotero intermedio. Sobre dicho corte frontal se dibujó una retícula de 10 x 5 cm, centrada en el gotero y se tomaron medidas de conductividad eléctrica a humedad de campo en cada una de las celdas resultantes, mediante la sonda WET sensor de Delta-T instruments.

Tabla 1. Número de riegos mensuales y volumen de agua aportado durante el ciclo de ensayo del cultivo

	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Total
Número de riegos	4	16	17	14	13	20	18	102
Volumen (L m ⁻²)	8	36	46	28	26	40	49	233

3. Resultados y discusión

3.1. Propiedades de los acolchados

La distribución de tamaños de partículas se muestra en el Gráfico 1. El acolchado con grava (M1) tiene un tamaño de partícula predominante superior a 5 mm. En contraste, el acolchado con arena (M2) se caracteriza por tener un diámetro de partícula dominante incluido en el rango de 0,1-1,0 mm. La densidad aparente del acolchado de grava es de 1.350,93 kg m⁻³ (77,25 sd; n = 3) mientras la del acolchado con arena es de 1.226,10 kg m⁻³ (159,15 sd; n = 3). Las curvas de retención de agua del acolchado (Gráfico 2, izquierda) muestran que la cantidad de agua retenida por la grava es muy baja, sobre todo comparada con la cantidad retenida por el acolchado con arena, especialmente a bajas presiones. La porosidad total fue de 0,46 y 0,48 cm³ cm⁻³ de suelo, respectivamente para M1 y M2 y la distribución de tamaño de poro se muestra en el Gráfico 2 derecha, apreciándose la abundancia de macroporos existente en los dos acolchados, especialmente en M1 con más del 90 % de su volumen poroso total, lo que favorece la infiltración muy rápida del agua. La distribución del tamaño de poros justifica el comportamiento de las curvas características de humedad. La conductividad hidráulica saturada en el acolchado con arena fue Kfs= 0,00149 cm s⁻¹ (sd. 0,00043; n=6) y el potencial de flujo matricial (ϕ_m), como indicador de la capilaridad ejercida sobre el agua por un medio poroso durante el proceso de infiltración o drenaje, fue $\phi_m = 0,0816$ cm² s⁻¹. La relación entre ambos parámetros ($\alpha=Kfs/\phi_m=0,02$)

expresa la relativa importancia de los fenómenos de capilaridad en el flujo insaturado de agua en este tipo de acolchado. Para el acolchado con grava no fue posible determinar con precisión los parámetros hidráulicos mediante el permeámetro, dadas sus características físicas, pero cabe esperar que los fenómenos de capilaridad en el flujo insaturado de agua sean despreciables.

Gráfico 1. Distribución de tamaño de partícula de los acolchados empleados en los ensayos. M1 acolchado con grava. M2 acolchado con arena. En mm

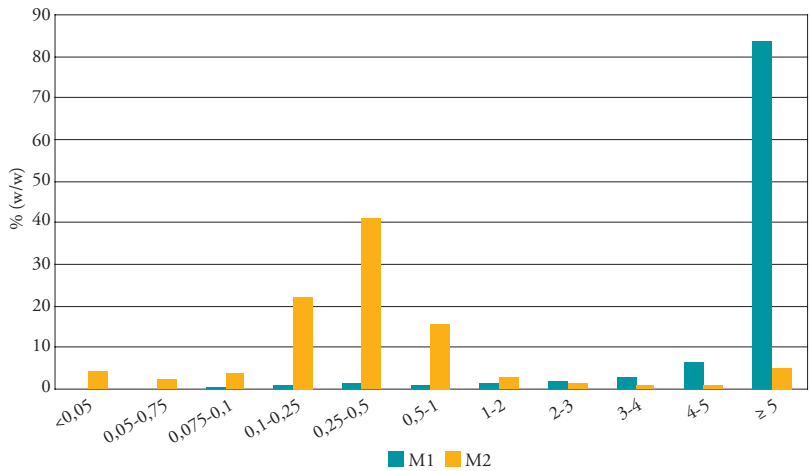
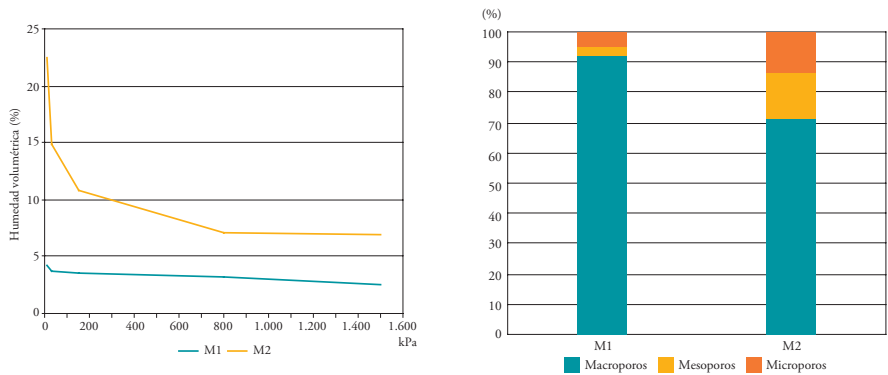


Gráfico 2. A la izquierda, curvas características de humedad de los acolchados utilizados en los ensayos. A la derecha distribución de tamaño de poros de ambos acolchados



3.2. Principales características de los suelos

El Gráfico 3 (izquierda) muestra la distribución de tamaño de partícula. El suelo franco arenoso (S1), distribuido en las parcelas experimentales P1 y P2, muestra mayores porcentajes de arena de tamaño medio (0,1-1 mm) mientras que el suelo más pesado (S2), distribuido en las parcelas experimentales P3 y P4, muestra una proporción mayor de partículas de tamaño limo (0,02 a 0,002 mm), lo que condiciona la distribución del tamaño de poros. El suelo S1 presenta mayor macroporosidad que el suelo S2 (Gráfico 3, derecha), aunque este último es capaz de retener más agua a tensiones más bajas (Gráfico 4), y, aunque el contenido en arcilla es similar en ambos suelos, existen diferencias importantes en cuanto a su mineralogía que afectan a su comportamiento hidráulico (Tabla 2). Así, el suelo S2 presenta un porcentaje elevado de arcillas de naturaleza esmectítica, que tienden a expandirse reduciendo la porosidad cuando el suelo está húmedo y a retraerse cuando el suelo está seco, lo que permite explicar el comportamiento de la conductividad hidráulica en saturación mucho más bajo en el suelo S2 que en el suelo S1.

Gráfico 3. Distribución de tamaño de partículas (izquierda, en mm) y distribución del tamaño de poros (sobre porosidad total, derecha) para los suelos empleados en este estudio. S1 suelo franco arenoso de las parcelas P1 y P2; S2 suelo franco de las parcelas P3 y P4

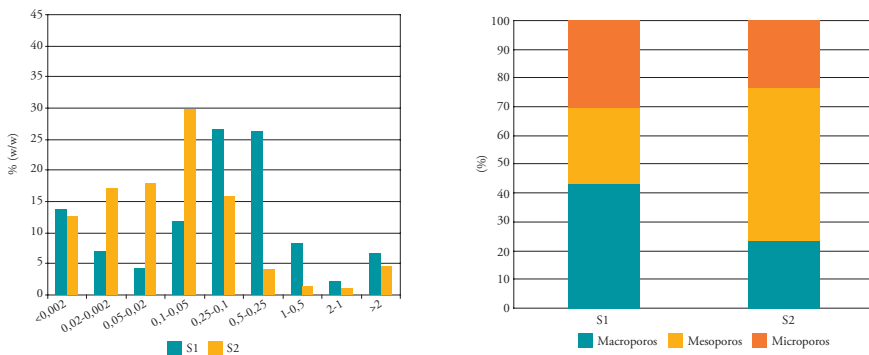
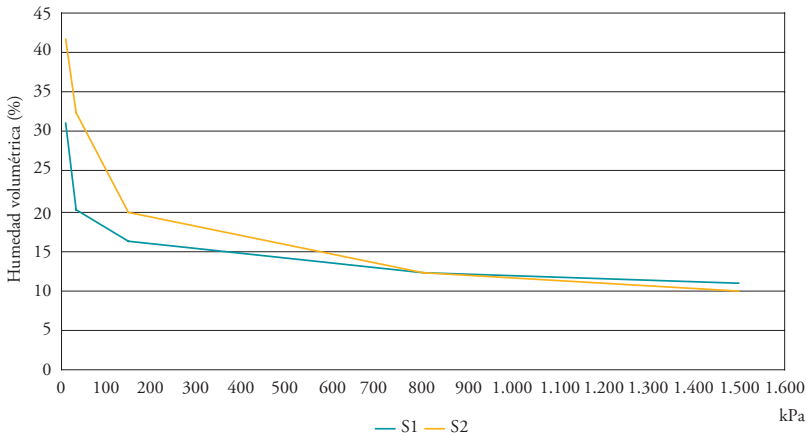


Tabla 2. Propiedades y análisis mineralógico semicuantitativo de los suelos de cada una de las parcelas experimentales. TOC: carbomo orgánico total; CEC: capacidad de intercambio catiónico.

	S1	S2
pH	7,55 (0,106)	7,67 (0,099)
Densidad aparente (kg m ⁻³)	1477,53 (68,109)	1390,73 (60,981)
Densidad real (kg m ⁻³)	2234,65 (91,203)	2209,90 (208,236)
Kfs (cm s ⁻¹)	11,33 10 ⁻⁴ (0,000)	2,01 10 ⁻⁴ (0,000)
TOC (% p/p)	2,51 (0,332)	2,49 (0,163)
CEC (cmol+ kg ⁻¹)	10,52 (4,151)	9,26 (1,782)
Porosidad total (cm ³ cm ⁻³)	0,34 (0,000)	0,37 (0,007)
Esmectitas (%)	7,20 (0,140)	43,85 (4,030)
Ilitas (%)	80,30 (1,840)	41,20 (3,110)
Cloritas (%)	1,10 (0,140)	3,75 (0,920)
Caolinitas (%)	9,10 (0,280)	8,20 (1,700)
Interestratificados (%)	2,30 (1,840)	3,00 (1,700)

Gráfico 4. Curva característica de humedad para cada uno de los suelos empleados en el experimento



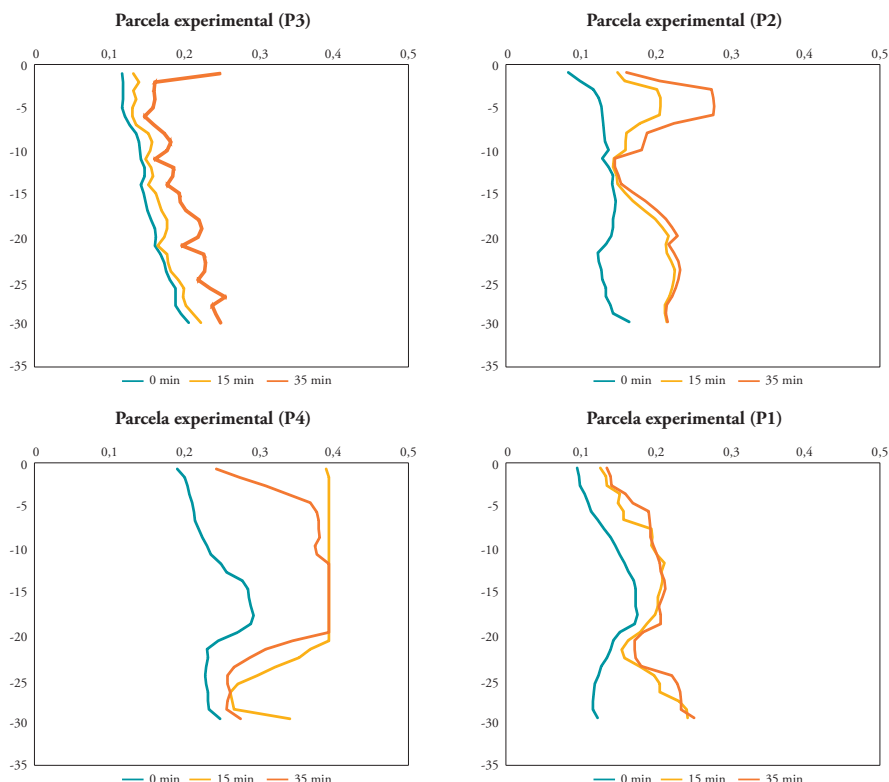
3.3. Patrón de distribución de humedad en las diferentes parcelas

a) Infiltración e inicio de la redistribución debajo del gotero.

Las propiedades combinadas de los acolchados y de los suelos definen finalmente el comportamiento de cada parcela experimental, tal como se observa a primera vista al contemplar el Gráfico 5. En la parcelas acolchadas con grava (P1 y P4, situadas en la parte de debajo del Gráfico, respectivamente a derecha e izquierda), el caudal suministrado por el gotero infiltra rápidamente y alcanza la interfase con el sustrato aportado sin sufrir prácticamente modificación, dado que, por el gran tamaño de los poros, el potencial matricial y la capacidad de retención de agua son prácticamente despreciables. El sustrato S1, (parcela P1, abajo a la derecha) con mayor macroporosidad y sin arcillas esmectíticas, presenta una conductividad hidráulica en saturación varias veces superior a la del sustrato S2, con lo cual, la infiltración es más rápida y el frente de humectación se distribuye con bastante rapidez en profundidad. Sin embargo, en la parcela P4, el salto brusco en las condiciones hidráulicas provoca un estado de saturación inmediatamente por debajo del gotero, que alcanza incluso parte de la zona cubierta con grava.

En las parcelas P2 y P3 (arriba en el Gráfico 5, a derecha e izquierda respectivamente), la menor macroporosidad de la arena regula el flujo emitido por el gotero. El potencial matricial en las zonas adyacentes al emisor es suficientemente bajo (la capacidad de «succión capilar» es lo suficientemente alta) como para que el movimiento lateral del agua en la capa de arena sea importante. Esto hace que parte del volumen de agua emitido quede «almacenado» temporalmente en la capa de acolchado, con lo que el caudal que finalmente llega a la interfase con el sustrato de abajo será diferente del emitido por el gotero. La transición entre ambas capas es mucho menos brusca que en el caso anterior y el paso de agua está condicionado por la diferencia en las K_s de las capas.

Gráfico 5. Patrón de humectación de cada una de las parcelas experimentales estimado según la sonda colocada a 5 cm del gotero durante el proceso de infiltración e inmediatamente tras su cese



El eje de abscisas muestra la humedad expresada en $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. El eje de ordenadas, la profundidad, correspondiendo el valor de cero a la superficie del suelo.

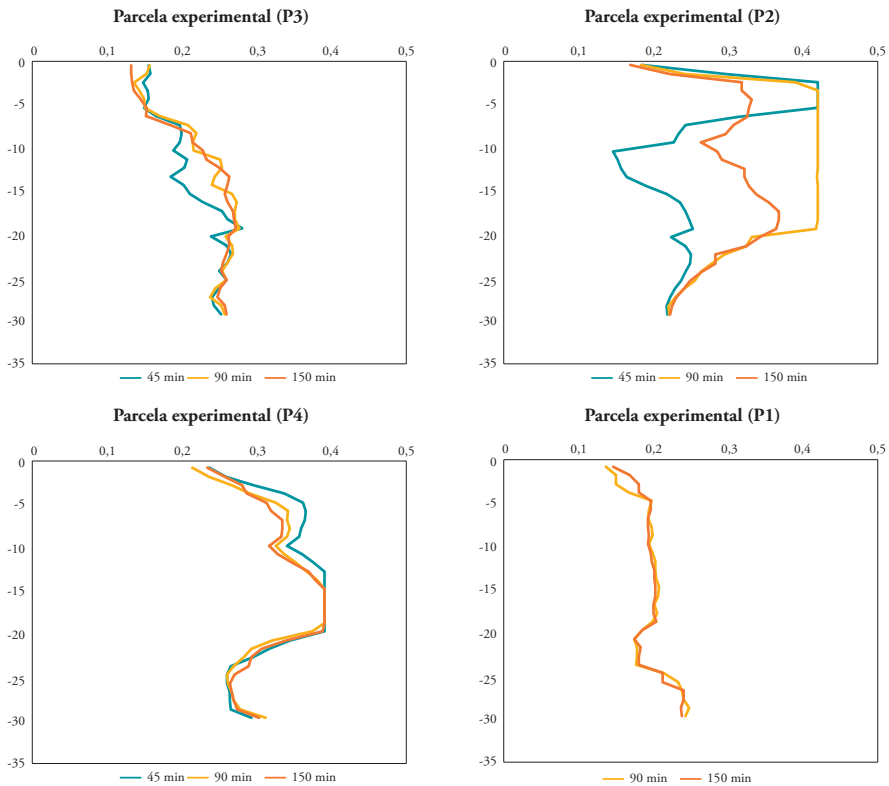
El color de la curva indica el tiempo transcurrido desde el inicio del riego.

- b) Redistribución rápida del agua en las primeras horas tras finalizar los riegos, debajo del gotero.

Como puede apreciarse de nuevo en el Gráfico 6, el comportamiento del patrón de humectación depende de la combinación acolchado-tipo de suelo. El suelo de la parcela P1, con la mayor capacidad de infiltración en todos los casos, alcanza un equilibrio relativamente rápido y no detectamos grandes variaciones de humedad bajo el gotero en los primeros momentos. Algo similar pasa en el suelo de la parcela P4, con una diferencia importante en el contenido

de humedad total detectado derivado de las propias características del sistema poroso, que provoca condiciones de saturación y anoxia.

Gráfico 6. Patrón de humectación de cada una de las parcelas experimentales estimado según la sonda colocada a 5 cm del gotero durante el proceso de redistribución rápida tras el riego



El eje de abscisas muestra la humedad expresada en $m^3 m^{-3}$. El eje de ordenadas, la profundidad, correspondiendo el valor de cero a la superficie del suelo.

El color de la curva indica el tiempo transcurrido desde el inicio del riego.

Sin embargo, en la parcela P2, con el mismo tipo de sustrato que la parcela P1, podemos observar cómo la arena ha retenido la mayor parte del agua emitida por el gotero y ha ralentizado el flujo hacia la interface con el sustrato subyacente. A su vez, la relación entre K_s del acolchado y K_s del sustrato subyacente es más estrecha en esta parcela que en la P3, también acolchada con arena pero con un sustrato con

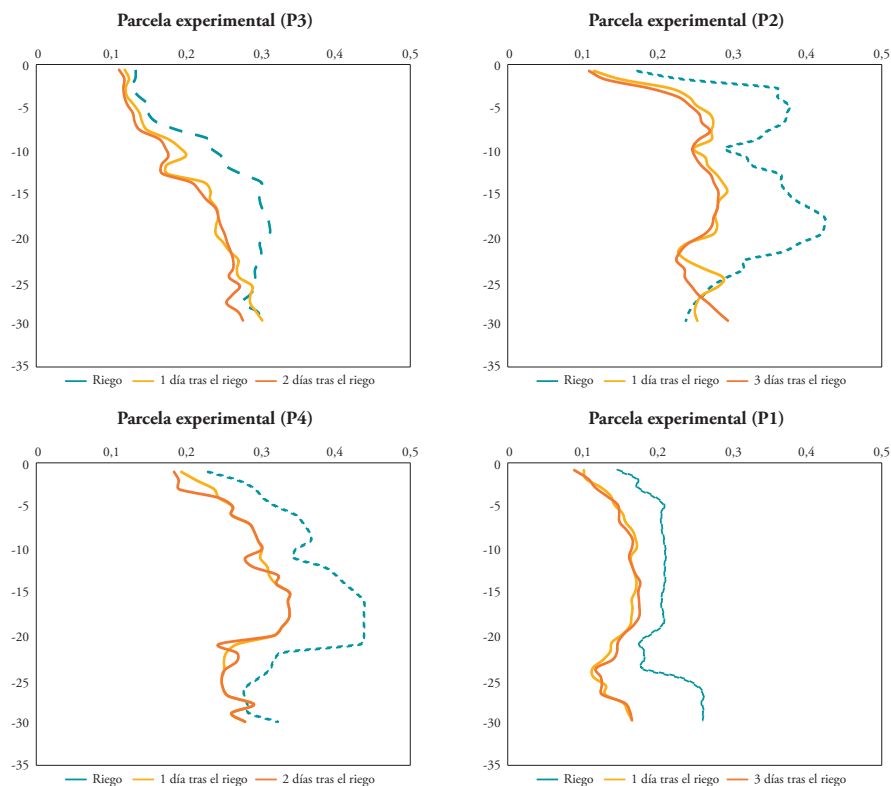
una porosidad más fina. Una vez que el frente de humectación alcanza la interface en la parcela P2, el paso es relativamente rápido, el potencial gravitacional parece adoptar un papel importante, ayudando al flujo en profundidad, y se satura la capa de abajo. Posteriormente tanto la capa de acolchado como el sustrato subyacente se comportan de manera similar, disminuyendo su contenido en humedad.

En la parcela P3, el avance del frente de humectación por el sustrato es bastante más progresivo y el suelo va incrementando su humedad paulatinamente en el intervalo de profundidad situado entre los 10 y 20 cm, redistribuyendo el agua por «capilaridad» en función de la diferencia de potencial matricial. En este caso parece que el que el potencial gravitacional tiene un papel menos determinante.

c) Redistribución lenta tras el riego, debajo del gotero.

Este tal vez sea el único caso en que el comportamiento de todos los sectores es similar, por cuanto en todos los casos se aprecia una disminución del contenido de humedad en el perfil del suelo (Gráfico 7). Sin embargo, lo más importante de esta situación es que, como el lector puede observar si compara con el gráfico inicial (Gráfico 5), las condiciones que alcanza el suelo al finalizar las mediciones son diferentes de las alcanzadas al inicio de los ensayos, lo que implicará que un nuevo riego partirá de una situación distinta en cada caso. La capacidad de almacenamiento de agua para el próximo riego no será la misma y las condiciones de saturación se alcanzarán antes para el mismo volumen de agua aplicada.

Gráfico 7. Patrón de humectación de cada una de las parcelas experimentales estimado según la sonda colocada a 5 cm del gotero durante el proceso de redistribución lenta tras el riego



El eje de abscisas muestra la humedad expresada en $m^3 m^{-3}$. El eje de ordenadas, la profundidad, correspondiendo el valor de cero a la superficie del suelo.

El color de la curva indica el tiempo transcurrido desde el inicio del riego.

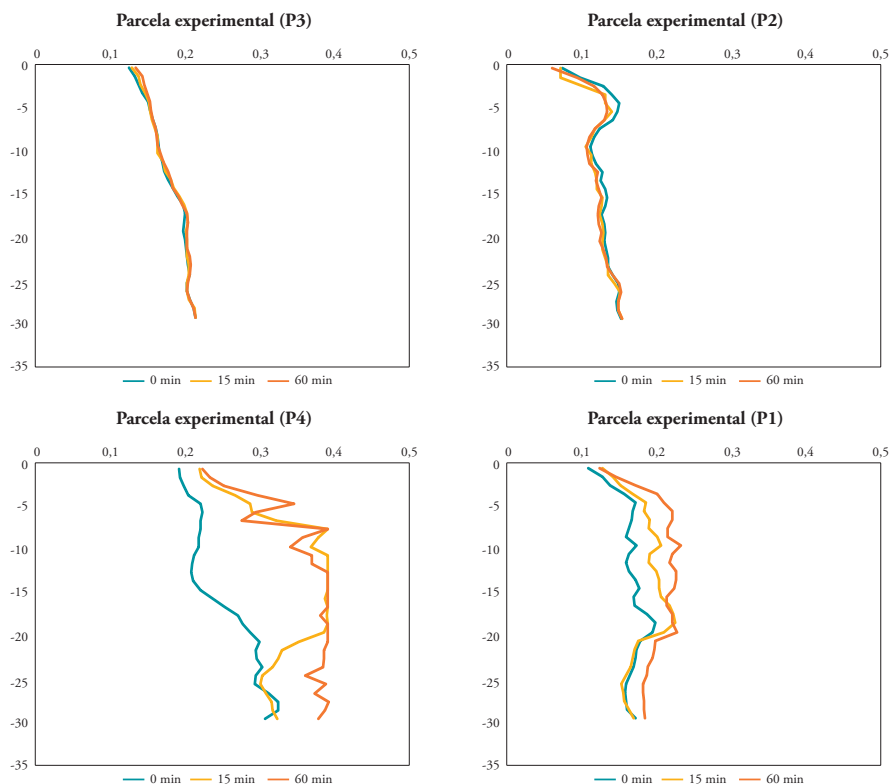
La curva punteada marcada como riego corresponde a la última medida dada en la Figura 6, con objeto de poder establecer comparaciones.

- d) Infiltración e inicio de la redistribución en la sonda situada a 25 cm del gotero.

En el Gráfico 8 llama poderosamente la atención el diferente comportamiento de los gráficos de arriba, que tienen en común el estar acolchadas con arena, de las de abajo, acolchadas con grava. Mientras que en las primeras, durante el riego y en los primeros minutos tras finalizar este no observamos cambios en el perfil de humectación, estos son muy aparentes en los sectores cubiertos con grava, principalmente en la parcela P4, cuyo sustrato tiene una capacidad de infiltración menor. Tal como decíamos en la discusión teórica acerca del proceso de infiltración, cuando tenemos una capa de textura gruesa situada sobre otra de textura mucho más fina, en el caso de un riego por goteo, el exceso de caudal que llega a la interface y no puede infiltrar en la capa inferior debe distribuirse lateralmente por dicha interface hasta alcanzar una superficie tal que la capacidad de infiltración así mayorada compense el caudal recibido. Dado que la capacidad de infiltración del sustrato situado en la parcela P1 es notablemente superior al de la parcela P4, la superficie necesaria para infiltrar el caudal recibido en esta parcela será inferior a la P4 y, a la misma distancia del emisor, las condiciones de humedad serán inferiores en la parcela P1 que en la parcela P4².

² Al haber estado las parcelas P3 y P4 sin regar durante 30 días, el grado de expansión de las arcillas esmectíticas es bajo y la infiltración inicial es superior a la que se alcanzaría una vez iniciados los riegos. En concreto, en la parcela P4, el cambio de condiciones hidráulicas es tan abrupto que, una vez expandidas las arcillas esmectíticas, se produce un encharcamiento visible en la superficie del acolchado de grava ante riegos abundantes.

Gráfico 8. Patrón de humectación de cada una de las parcelas experimentales estimado según la sonda colocada a 25 cm del gotero durante el proceso de infiltración y redistribución inicial



El eje de abscisas muestra la humedad expresada en $m^3 m^{-3}$. El eje de ordenadas, la profundidad, correspondiendo el valor de cero a la superficie del suelo.

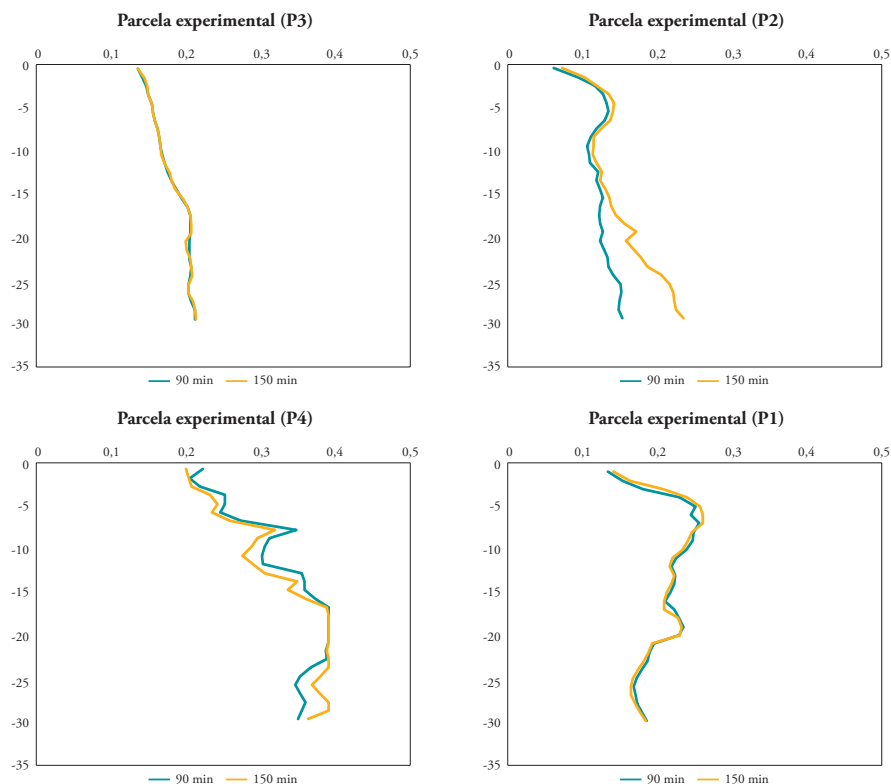
El color de la curva indica el tiempo transcurrido desde el inicio del riego.

e) Redistribución a 25 cm del gotero.

En este apartado compararemos los Gráficos 9 y 10 conjuntamente. En la primera (Gráfico 9), se observa cómo poco tiempo después del riego, a 25 cm del gotero se ha alcanzado una cierta situación de equilibrio en las parcelas P1 y P4 acolchadas con grava, en las que la superficie de infiltración había alcanzado al menos 25 cm de distancia a partir del gotero. Pero se observa también un efecto importante en el gráfico correspondiente a la parcela P2 (arriba a la derecha) y es el aumento del contenido de humedad en la parte más profunda del perfil sin un incremento equivalente o similar en la zona superficial. Esto es debido a un flujo lateral profundo mediado por el gradiente de potencial matricial, que expande con relativa rapidez la zona mojada sin modificar el contenido de humedad en superficie y, por tanto, sin que pueda perderse por evaporación. En la parcela P3, también acolchada con arena, podemos observar este mismo fenómeno (Gráfico 10), pero con un tiempo de retardo mucho más acusado (1 día), dada la porosidad mucho más fina, que, como dijimos antes, ralentiza el proceso de redistribución. Este patrón de redistribución de la humedad no es observable desde la superficie del suelo y modificará las condiciones en las que el suelo reciba los próximos riegos, pudiendo darse el caso de que, de no ser tenido en cuenta, al cabo de un tiempo el suelo alcance condiciones de saturación y anoxia e impida el correcto desarrollo radicular. Observaremos, si el manejo de riego no es adecuado (sobre todo en la parcela P3), que las raíces tenderán a aparecer en superficie e incluso, si el problema es acusado, a desarrollarse preferentemente en el propio acolchado.

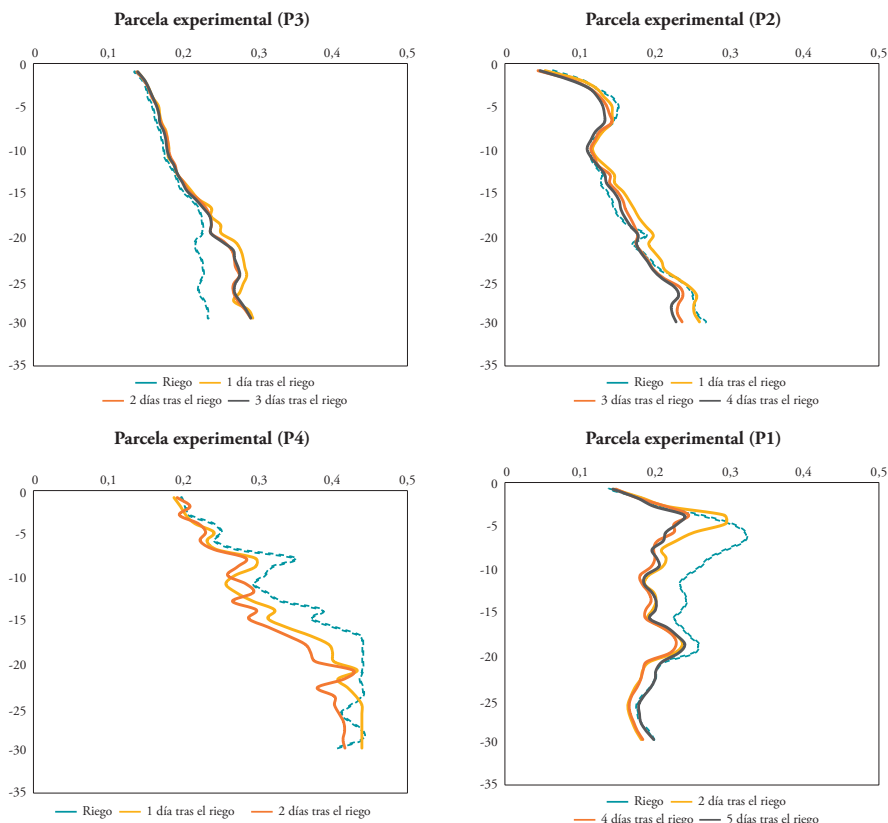
Las parcelas P1 y P4, que han recibido agua desde la superficie del suelo, disminuyen su contenido de humedad gradualmente (Gráfico 10) hasta alcanzar unas condiciones de capacidad de campo al cabo de varios días tras el riego, dependiendo de la profundidad a la que nos refiramos.

Gráfico 9. Patrón de humectación de cada una de las parcelas experimentales estimado según la sonda colocada a 25 cm del gotero durante el proceso de redistribución inicial



*El eje de abscisas muestra la humedad expresada en $m^3 m^{-3}$. El eje de ordenadas, la profundidad, correspondiendo el valor de cero a la superficie del suelo.
 El color de la curva indica el tiempo transcurrido desde el inicio del riego.*

Gráfico 10. Patrón de humectación de cada una de las parcelas experimentales estimado según la sonda colocada a 25 cm del gotero durante el proceso de infiltración y redistribución lenta



El eje de abscisas muestra la humedad expresada en $m^3 m^{-3}$. El eje de ordenadas, la profundidad, correspondiendo el valor de cero a la superficie del suelo.

El color de la curva indica el tiempo transcurrido desde el inicio del riego.

La curva punteada marcada como riego corresponde a la última medida dada en el Gráfico 9, con objeto de poder establecer comparaciones.

4. Efecto del patrón de distribución de la humedad del suelo sobre la distribución de sales en cada sector

De nuevo la Figura 1 muestra de un simple vistazo cómo, habiendo recibido los mismos tratamientos, la combinación acolchado-sustrato, condiciona notablemente el patrón de distribución de sales, evidentemente mediatiza-

do por el comportamiento de la humedad. Las parcelas con mayor capacidad de infiltración y redistribución rápida de agua (P1 y P2) son las que menor conductividad eléctrica presentan en el perfil, apreciándose los menores niveles debajo del gotero. Entre estas dos parcelas se observan ciertas diferencias: la primera de ellas es el menor valor de la conductividad en la parcela P1. Si recordamos, el acolchado de grava tiene una nula capacidad de retención de agua y permite el paso casi inalterado de la aportada por el gotero. Al llegar a la interface, el agua se distribuía horizontalmente delimitando una notable superficie de infiltración. Esto provoca que el lavado sea intenso y homogéneo en profundidad, a la vez que evita la evaporación de parte del agua, ya que no es retenida por el acolchado y percola con velocidad.

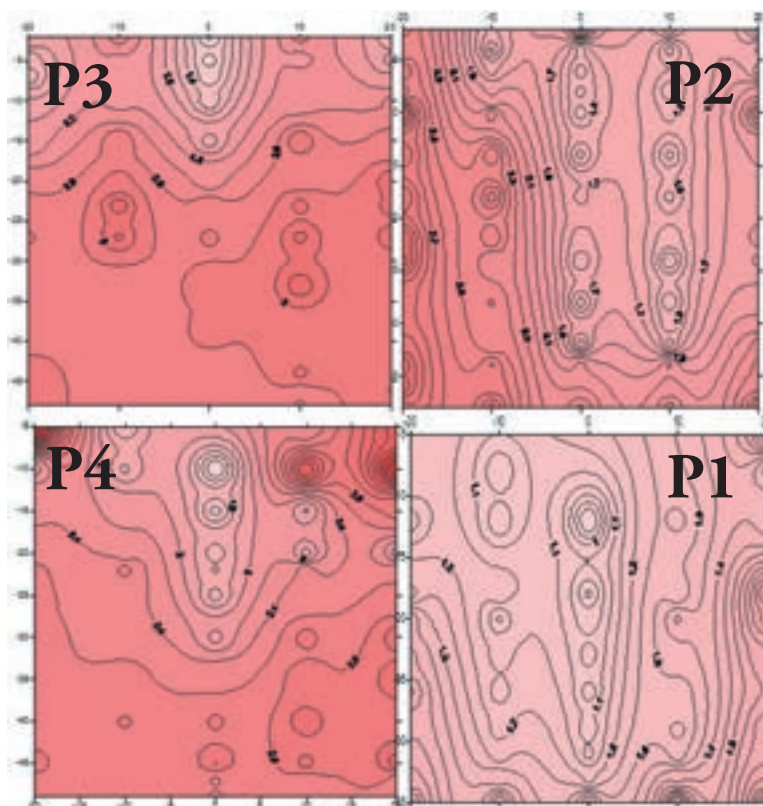
En la parcela P2, la arena retiene parte del agua y es la que inicialmente delimita cuál será la superficie de infiltración posterior en el sustrato subyacente. Al ser hidráulicamente parecidos, la expansión de la superficie de infiltración en la interface con el sustrato subyacente es pequeña y el proceso de infiltración vertical a favor de la gravedad rápido, lo que delimita una zona lavada más pequeña que en la parcela P1 y favorece una cierta acumulación de sales en la periferia del perfil, donde el lavado vertical es menor y está más sometida a la influencia de la redistribución rápida del agua que vimos más arriba. Esta acumulación también aparece en el propio acolchado dado que participa en la nutrición hídrica del cultivo permitiendo que se produzca el proceso de evapotranspiración en él.

En la parcela P3, el acolchado con arena también participa en el proceso de acumulación y redistribución del agua, pero, en este caso, el cambio en las condiciones hidráulicas es mucho más abrupto que en la parcela P2, lo que provoca la extensión lateral de la superficie de infiltración en la interface con el sustrato subyacente, ralentizando el flujo de agua en profundidad. El acolchado aparece muy lavado debajo del emisor y tiende a acumular sales fuera de la zona de influencia, entre dos emisores consecutivos. En el sustrato, la redistribución de agua fundamentalmente por flujo capilar, sin una dirección preferente, provoca una homogeneización en el reparto de sales por todo el perfil.

En la parcela P4 es donde se produce el contraste más abrupto en las condiciones hidráulicas del acolchado y el sustrato. La infiltración se ve notablemente reducida y la distribución horizontal del agua es máxima. Conforme nos alejamos del emisor, las sales se acumulan en la interface desde donde el agua se evapora en gran medida, con lo cual encontramos elevadas conductividades eléctricas, tanto mayores cuanto más nos alejamos del gotero. El

sustrato de abajo presenta una distribución algo homogénea dado que predomina el flujo capilar, al igual que en la parcela P3.

Figura 2. Distribución de la conductividad eléctrica en profundidad bajo la línea portagoteros para cada una de las parcelas de estudio



La intensidad del color es proporcional al valor de la conductividad eléctrica. El eje de abscisas muestra la distancia al gotero (valor cero del eje) expresada en centímetros. El signo indica la dirección hacia la izquierda o hacia la derecha del gotero. El eje de ordenadas muestra la profundidad del centro de la cuadrícula muestreada, correspondiendo el valor cero a la superficie del suelo. Parcela P1 abajo a la derecha; Parcela P2 arriba a la derecha; Parcela P3 arriba a la izquierda; Parcela P4 abajo a la izquierda.

5. Conclusiones

La elección del par acolchado-sustrato en los invernaderos determinará conjuntamente el patrón de humectación y distribución de sales del sistema edáfico y, por tanto, la disponibilidad de los recursos para los vegetales

o la probabilidad de degradación del sistema. Aunque no se han presentado evidencias en este trabajo, cabe suponer que el comportamiento del sistema radicular, su arquitectura y la eficiencia en la captación de los recursos proporcionados se verá igualmente afectada. No existe un sustrato óptimo para todos los casos, ni una granulometría del acolchado idónea. Hay que tener en consideración el comportamiento conjunto de ambos y, en función de este, elegir el tipo de gotero que más nos interese para evitar situaciones no deseadas.

Referencias bibliográficas

- AL-HARBY, A. A. B. O.; AL-DARBY, A. M. y BDEL-AZIZ R. A. (2005): «Effect of mulching rates on evaporation, water and salt distribution in two soils with different texture from upper soil layer, in Derab Region, Kingdom of Saudi Arabia»; *Arab Gulf Journal of Scientific Research* (23); pp. 140-149.
- ATHY, E. R.; KEIFFER, C. H. y STEVENS, M. H. (2006): «Effects of mulch on seedlings and soil on a closed landfill»; *Restoration Ecology* (14); pp. 233-241.
- BLAKE, G. R. y HARTGE, K. H. (1986): «Particle density»; en KLUTE, A., ed.; *Methods of Soil Analysis. Part I. Physical and Mineralogical Methods. Second Edition*. EEUU, Wisconsin, American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America, Inc.; pp. 377-382.
- DANIELSON, R. E. y SUTHERLAND, P. L. (1986): «Porosity»; en KLUTE, A., ed.; *Methods of Soil Analysis. Part I. Physical and Mineralogical Methods*. EEUU, Wisconsin, American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America, Inc. 2.^a edición; pp. 443-461.
- DELTA-T DEVICES (2001): *User manual for profile probe PR1*. Reino Unido, Cambridge. Delta-T Devices Ltd.
- EVETT, S. R.; SCHWARTZ, R. C.; CASANOVA, J. J. y HENG, L. K. (2012): «Soil water sensing for water balance, ET and WUE»; *Agricultural Water Management* (104); pp. 1-9.
- EVETT, S. R. y PARKIN, G. W. (2005): «Advances in Soil Water Content Sensing: The continuing Maturation of Technology and Theory»; *Vadose Zone Journal* (4); pp. 986-991.
- GONZÁLEZ-SOUSA, E.; BRAUD, I.; THONY, J. L.; VAUCLIN, M. y CALVET J. C. (2001): «Heat and water exchanges of fallow land covered with a plant residue mulch layer: a modelling study using the three year MUREX data set»; *Journal of Hydrology* (244); pp. 119-136.

- INOUE, I. M.; OULD AHMED, B. A.; SAITO, T.; IRSHAD, M. y UZOMA, K. C. (2008): «Comparison of three dielectric moisture sensors for measurement of water in saline soil»; *Soil Use and Management* (24); pp. 156-162.
- KEMPER, W. D.; NICKS, A. D. y COREY, A. T. (1994): «Accumulation of water in soils under gravel and sand mulches»; *Soil Science Society of America Journal* (58); pp. 56-63.
- NOBORIO, K. (2001): «Measurements of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review»; *Computers and Electronics in Agriculture* (31); pp. 213-237.
- REYNOLDS, W. D. y ELRICK, D. E. (1985): «In situ measurement of field saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the alpha-parameter using the Guelph permeameter»; *Soil Science* (140); pp. 292-301.
- RICHARDS, L. A. (1954): «Diagnosis and improvement of saline and alkali soils»; *Handbook 60*. EEUU, Washington, U. S. Salinity Laboratory (USDA).
- SHARMA, N. K.; SINGH, P. N.; TYAGI, P. C. y MOHAN, S. C. (1998): «Effect of leucaena mulch on soil-water use and wheat yield»; *Agriculture water management* (35); pp. 191-200.
- SOIL CONSERVATION SERVICE (1972): *Soil survey laboratory methods and procedures for collecting samples*. EEUU, Washington, USDA.
- WALKER, J. P.; WILLGOOSE, G. R. y KALMA, J. D. (2004): «In situ measurement of soil moisture: a comparison of techniques»; *Journal of Hidrology* (293); pp. 85-99.
- WANG, J. R. y SCHMUGGE, T. J. (1980): «An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content»; *IEEE Transaction of Geoscience and Remote Sensing GE* (18); pp. 288-295.
- YAMANAKA, T.; INOUE, M. y KAIHOTSU, I. (2004): «Effects of gravel mulch on water vapour transfer above and below the soil surface»; *Agricultural Water Management* (67); pp. 145-155.
- YUAN, C.; ZHANG, X.; LEI, T.; LIU, H. y LI, X. (2008): «Effects of mulching sand and gravel size on soil moisture evaporation»; *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (24); pp. 25-28.