

## USO DEL AGUA DE RIEGO EN LOS CULTIVOS EN INVERNADERO

Fernández, M. D.<sup>(1)</sup>; Thompson, R. B.<sup>(2)</sup>; Bonachela, S.<sup>(2)</sup>; Gallardo, M.<sup>(2)</sup>; Granados, M. R.<sup>(2)</sup>  
Fundación Cajamar<sup>(1)</sup> y Universidad de Almería<sup>(2)</sup>

### RESUMEN

La cuenca Mediterránea alberga una importante superficie de invernaderos. Este rápido crecimiento se debe a que los invernaderos han permitido el desarrollo económico de zonas pobres 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 Almería, se ha trabajado desde distintas instituciones por mejorar el uso del agua de riego y reducir los problemas medioambientales relacionados con el riego. En este capítulo, se recogen los principales resultados de estos trabajos de investigación. En primer lugar, hay una caracterización precisa de los sistemas de almacenamiento de agua (balsas de riego) y de las instalaciones de riego, así como de la uniformidad de riego. En segundo lugar, se ha medido el aporte de agua de riego en explotaciones comerciales, y posteriormente se ha analizado el uso del agua mediante indicadores con el objetivo de detectar las ineficiencias e indicar dónde se puede actuar para mejorar el manejo del riego. Paralelamente, se han desarrollado o evaluado herramientas que pueden ayudar a optimizar el uso del agua. Se han evaluado varios tipos de sensores que miden el estado hídrico del suelo y de la planta, y se ha desarrollado una metodología que permite calcular el volumen de riego a partir de datos climáticos. Un problema medioambiental importante y que está relacionado con el riego, es la contaminación de acuíferos por nitratos. Se han caracterizado las prácticas agrícolas que contribuyen a esta contaminación y se han desarrollado herramientas que pueden ayudar a hacer un manejo más óptimo de la fertilización nitrogenada y reducir la lixiviación de nitratos.

### SUMMARY

*In the Mediterranean Basin there is a large area of simple plastic greenhouses. The recent rapid expansion of the greenhouse area has enabled substantial economic development of previously poor regions, and a more efficient use of resources such as land and water, the latter being a scarce resource in this region. Because of the importance of water to the sustainability of the greenhouse-based vegetable production system in Almería, several institutions have worked to improve the use of water for irrigation and to reduce the environmental problems associated with irrigation. In this chapter, the most important results from this research are presented. Firstly, there is a detailed description of the on-farm water storage and drip irrigation systems, such as irrigation uniformity. Secondly, on-farm use of water for irrigation was measured and then analyzed using irrigation performance indicators to detect inefficiencies and to indicate where irrigation water use could be improved. Tools have been developed or evaluated, as to their suitability in this system, to optimize water use. Various sensors to measure soil and plant water status have been evaluated, and a method was developed to calculate the irrigation requirements from climate data. An important environmental problem associated with irrigation is nitrate contamination of groundwater. The practices causing nitrate contamination from this system were characterized and tools have been developed to increase nitrogen use efficiency and reduce nitrate leaching.*

## 1. Introducción

El agua utilizada en la agricultura supone en torno a dos tercios de toda el agua usada en el mundo, porcentaje que suele ser mayor en zonas áridas y semiáridas con fuerte desarrollo agrícola, como el litoral mediterráneo español. En un futuro próximo, la mayor necesidad de alimentos, derivada del esperado aumento de la población mundial y la mejora de su calidad de vida, conducirá a una mayor demanda de agua para regar los cultivos y aumentará la competencia por este cada vez más escaso recurso. En este contexto, hay una creciente demanda social por un uso más productivo y sostenible del agua y por un mejor conocimiento de su uso en la agricultura, el principal usuario.

La provincia de Almería ha padecido durante décadas un fuerte déficit estructural de agua, que ha originado un progresivo agotamiento de los acuíferos de la zona (Sánchez-Martos *et al.*, 1999). La agricultura en invernadero, con unas 27.000 ha que aportan más del 90 % de la producción final vegetal de Almería, es la principal usuaria de agua en la provincia. En este contexto, la estación experimental de la Fundación Cajamar, junto con las universidades de Almería y Córdoba, ha desarrollado desde principios de los años 90 una línea de investigación prioritaria con el objetivo de cuantificar y analizar el uso del agua en los cultivos en invernadero, y generar métodos y herramientas que permitan mejorar su eficiencia y productividad.

## 2. Origen del agua

La mayoría del agua de riego usada en los invernaderos de Almería es de origen subterráneo (80 % de estas explotaciones utilizan agua subterránea, Céspedes *et al.*, 2009), lo que ha provocado la sobreexplotación de los acuíferos de la zona. En los últimos años, como en otras zonas áridas y semiáridas del mundo, se ha impulsado el uso de fuentes de agua alternativas. El agua depurada reciclada se utiliza, en la actualidad, como fuente primaria de riego en unas 2.000 ha de invernaderos de la Vega de Almería y, en un futuro próximo, está previsto reutilizar gran parte de las aguas depuradas del Campo de Dalías. Sería aconsejable mejorar la calidad de dichas aguas, ya que los tratamientos primarios, secundarios o terciarios que se realizan son, con frecuencia, insuficientes o inadecuados (Bonachela *et al.*, 2007). El agua desalinizada, a pesar de su mayor coste, también se está introduciendo progresivamente en zonas deficitarias

o con aguas de mala calidad del Levante de Almería. El agua de lluvia recogida de las cubiertas de los invernaderos es, en la actualidad, una fuente secundaria de agua en numerosas explotaciones. La extensión de esta práctica a toda la superficie invernada ayudaría a paliar sustancialmente el déficit de agua de riego, ya que la lluvia del litoral de Almería supone casi el 50 % de las necesidades hídricas de las principales rotaciones de cultivo en invernadero (Fernández *et al.*, 2007). La recogida del agua de condensación en los invernaderos puede ser otra fuente alternativa, sobre todo en las zonas más frías. En invernaderos del valle del Almanzora hemos recogido anualmente hasta 40 L m<sup>-2</sup> de agua condensada, aunque en zonas más cálidas (El Ejido) las cantidades recogidas fueron inferiores. Por último, la reutilización de los drenajes de los cultivos en sustrato, práctica generalizada en los invernaderos centroeuropeos, reduciría claramente las necesidades de agua y, sobre todo, reduciría los problemas de contaminación de agua y de suelos en la zona.

### 3. Sistemas de riego y almacenamiento de agua

Los invernaderos de Almería disponen de sistemas de riego que permiten distribuir agua y fertilizantes de forma uniforme (Céspedes *et al.*, 2009). Sin embargo, la uniformidad de la distribución del agua de riego, determinada mediante el coeficiente de uniformidad (Merriam y Keller, 1978), ha sido, generalmente, baja y apenas ha mejorado en las últimas décadas: Orgaz *et al.* (1986) encontraron un coeficiente de uniformidad medio del 76 % en los invernaderos del Campo de Dalías, mientras que, recientemente, Lupiáñez (2009) ha determinado un coeficiente de uniformidad medio del 77 % en la misma zona. Ambos valores están por debajo del mínimo obligatorio (85 %) del reglamento de producción integrada de cultivos hortícolas protegidos de Andalucía (Orden de 10 octubre de 2007, BOJA núm. 211). Teniendo en cuenta que la mayoría de los invernaderos ocupan superficies llanas y que las subunidades de riego suelen ser pequeñas, la uniformidad de distribución del agua de riego debería incrementarse mejorando el manejo y el mantenimiento de los sistemas de riego: regulación y control de presiones en las subunidades, reparación de fugas y limpieza de la red, manejo de balsas y filtros, etc. (Lupiáñez, 2009).

La mayoría de las explotaciones de invernaderos disponen de balsas de riego (83,5 %, Céspedes *et al.*, 2009) para garantizar el suministro hídrico a los cultivos, que son, en general, pequeñas y sin cubrir (21,7 % cubiertas). En la provincia de Almería se han inventariado 8.730 balsas mayores de 150 m<sup>2</sup>, que ocupan unos 6,17 km<sup>2</sup> y que están concentradas en las zonas invernadas (Casas *et al.*, 2011). El ahorro de agua estimado que supondría cubrir todas las balsas con mallas plásticas sería de unos 6,9 hm<sup>3</sup>, considerando una evaporación media anual de 1.404 L m<sup>-2</sup>. Sin embargo, el coste del agua ahorrada cubriendo las balsas sería menor que el coste de cubrirlas en la mayoría de zonas invernadas (Martínez Álvarez *et al.*, 2009). Por otro lado, en zonas con escasos ecosistemas acuáticos naturales, como el litoral de Almería, las balsas de riego abiertas desempeñan una importante función medioambiental de conservación de la biodiversidad (Casas *et al.*, 2011).

#### 4. Aportes de agua de riego

El aporte medio de agua de riego a los principales cultivo hortícolas en suelo (sin incluir el tomate), medidos durante 6 campañas agrícolas consecutivas (1993/94–1998/99) en 41 invernaderos representativos del Campo de Dalías (Fernández *et al.*, 2007), fue de 228 L m<sup>-2</sup> por ciclo de cultivo y osciló entre 158 L m<sup>-2</sup> en la judía verde de otoño-invierno y 363 L m<sup>-2</sup> en el pimiento de otoño-invierno (Tabla 1). En un estudio similar en el Campo de Níjar el aporte medio a un tomate de otoño-primavera fue de 558 L m<sup>-2</sup> (Carreño *et al.*, 2000). Estos valores son claramente inferiores a los aportes a dichos cultivos al aire libre (Fernández *et al.*, 2007), debido, sobre todo, a la menor demanda evaporativa en el invernadero (menor radiación solar y velocidad de viento), en comparación al aire libre (Orgaz *et al.*, 2005), y a que los cultivos hortícolas en invernadero suelen desarrollarse en ciclos centrados en invierno, mientras que al aire libre los ciclos suelen estar centrados en verano (Orgaz *et al.*, 2005).

Los aportes por campaña agrícola son generalmente mayores que por ciclo de cultivo, al ser frecuentes las rotaciones anuales de dos cultivos. Los aportes medios a las principales rotaciones de cultivo en invernadero del Campo de Dalías oscilaron entre 363 (pimiento de otoño-primavera) y 502 L m<sup>-2</sup> (pimiento de otoño-invierno + melón de primavera), con un valor promedio de 444 L m<sup>-2</sup> (Fernández *et al.*, 2007). Los aportes totales anuales suelen ser aún mayores, ya que es común realizar riegos de desinfect-

ción, lavado de sales y mantenimiento del sistema de riego entre campañas agrícolas. Considerando estos riegos suplementarios (Peña, 2009), el valor medio estimado del aporte total anual es de 495 L m<sup>-2</sup> en el campo de Dalías.

#### 4.1. Indicadores del uso del agua de riego

El análisis del uso del agua de riego en la agricultura se realiza mediante una serie de indicadores establecidos internacionalmente (Malano y Burton, 2000) y los más representativos a escala de explotación/parcela son:

- Aporte relativo de agua de riego: cociente entre el agua de riego aportada (L m<sup>-2</sup>) y la requerida para cubrir las necesidades del cultivo (L m<sup>-2</sup>);
- Productividad del agua de riego (€ m<sup>-3</sup>): cociente entre el valor económico generado por el cultivo (€ m<sup>-2</sup>) y el agua de riego aportada (m<sup>3</sup> m<sup>-2</sup>);
- Eficiencia en el uso del agua de riego (kg m<sup>-3</sup>): cociente entre el rendimiento comercial del cultivo (kg m<sup>-2</sup>) y el agua de riego aportada (m<sup>3</sup> m<sup>-2</sup>).

El valor medio del aporte relativo de agua de riego en los principales cultivos hortícolas del Campo de Dalías fue de 1,13 (Fernández *et al.*, 2007), lo que significa que los agricultores aportaron, de media, un 13 % más de agua de las necesidades de sus cultivos. Se trata de un valor medio aceptable, ya que los agricultores buscan maximizar el rendimiento y la calidad de sus productos. Sin embargo, hubo una elevada variabilidad en cada ciclo de cultivo (altos coeficientes de variación) y entre ciclos (Tabla 1). Así, el aporte relativo medio al pepino fue de 1,63, es decir, este cultivo, de media, fue regado muy excedentariamente. Además, los aportes relativos de agua de riego fueron muy excedentarios durante la fase de establecimiento de todos los cultivos y, en menor medida, durante la de desarrollo de los mismos (Fernández *et al.*, 2007). Este indicador muestra que podemos mejorar el uso de agua en los invernaderos ajustando los aportes a los requerimientos hídricos.

La productividad del agua de riego osciló entre 7,8 y 15,9 € m<sup>-3</sup> (Tabla 1), valores muy superiores a los de otras zonas regables andaluzas y españolas (Lorite *et al.*, 2004), debido a los menores aportes de agua y, sobre todo, a la elevada productividad y valor económico de las hortalizas en invernadero.

La eficiencia media en el uso del agua de riego osciló entre 15,3 y 35,6 kg m<sup>3</sup> (Tabla 1), valores inferiores a los medidos en cultivos en sustratos en invernaderos centroeuropeos. En cambio, estos valores son, en general, mayores que en los mismos cultivos al aire libre, debido a los menores aportes de agua y a la mayor productividad en invernadero (Fernández *et al.*, 2007).

**Tabla 1. Valores medios (coeficiente de variación entre paréntesis) de aportes y aportes relativos de agua de riego (RIS), y la eficiencia en el uso (IWUE) y productividad del agua de riego (WP) en los principales ciclos de cultivo hortícolas en los invernaderos del Campo de Dalías**

Ciclos	Aportes (L m <sup>2</sup> )	RIS			IWUE (kg m <sup>-3</sup> )	WP (€ m <sup>-3</sup> )	
		Ciclo	1	2			3
Pimiento O-I	311 (32)	0,95 (36)	2,78	1,27	0,91	21,0(40)	13,1(50)
Pepino	270 (40)	1,62 (40)	3,53	1,48	1,20	33,2(52)	12,4(59)
Judía O-I	158 (33)	1,18 (24)	4,28	1,06	0,76	15,3(45)	15,9(45)
Melón	177 (31)	1,00 (39)	3,52	1,19	0,52	22,8(34)	10,1(44)
Sandía	189 (38)	0,92 (33)	2,41	1,27	0,42	35,6(34)	7,8 (46)
Judía P	197 (24)	1,03 (28)	4,25	1,80	0,60	16,8(31)	15,4(53)
Pimiento O-P	363 (30)	1,02 (27)	4,85	0,88	0,68	16,9(23)	8,7 (40)

O: Otoño; I: Invierno; P: Primavera.

Se presentan valores del RIS para todo el ciclo de cultivo y para tres periodos a lo largo del mismo: establecimiento del cultivo (1); desarrollo del cultivo (2); y desde mitad hasta final del ciclo (3)

## 5. Programación del riego en invernadero

La programación del riego es un conjunto de procedimientos técnicos desarrollados para predecir **cuándo** y **cuánto** riego aplicar para cubrir las necesidades de los cultivos, y su importancia se pone de manifiesto cuando el agua es un recurso escaso y su coste es elevado. 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.

## 5.1. Programación del riego mediante sensores

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 fincas comerciales era muy limitado. El desarrollo tecnológico reciente ha permitido 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 controladores de riego y activar el riego. En invernadero, debido a la elevada frecuencia del riego y a la baja demanda evaporativa, el medio de cultivo se mantiene continuamente húmedo. La pequeña superficie de las fincas y la intensividad del manejo de los invernaderos favorecen el uso de las tecnologías de monitorización.

### 5.1.1. Programación del riego con sensores de humedad del suelo

Los sensores de humedad en el suelo miden (i) la humedad volumétrica del suelo ( $\Theta_v$ ) o (ii) el potencial matricial del suelo ( $Y_m$ ). La  $\Theta_v$  es la proporción del volumen de suelo ocupado por agua. El  $Y_m$  indica la disponibilidad de agua para los cultivos (Gallardo y Thompson, 2003a). La  $\Theta_v$  es una medida que necesita interpretación (Thompson y Gallardo, 2003). Los sensores de suelo pueden ser de lectura manual o automática, lo cual permite obtener información más detallada de la dinámica de uso del agua por el cultivo y su movimiento en el suelo. Los sensores de suelo se pueden usar con distintas configuraciones (Thompson y Gallardo, 2003); un sensor debe estar siempre en la zona de máxima concentración de raíces. Se pueden colocar más sensores en profundidades diferentes por ej. debajo de las raíces para controlar drenaje.

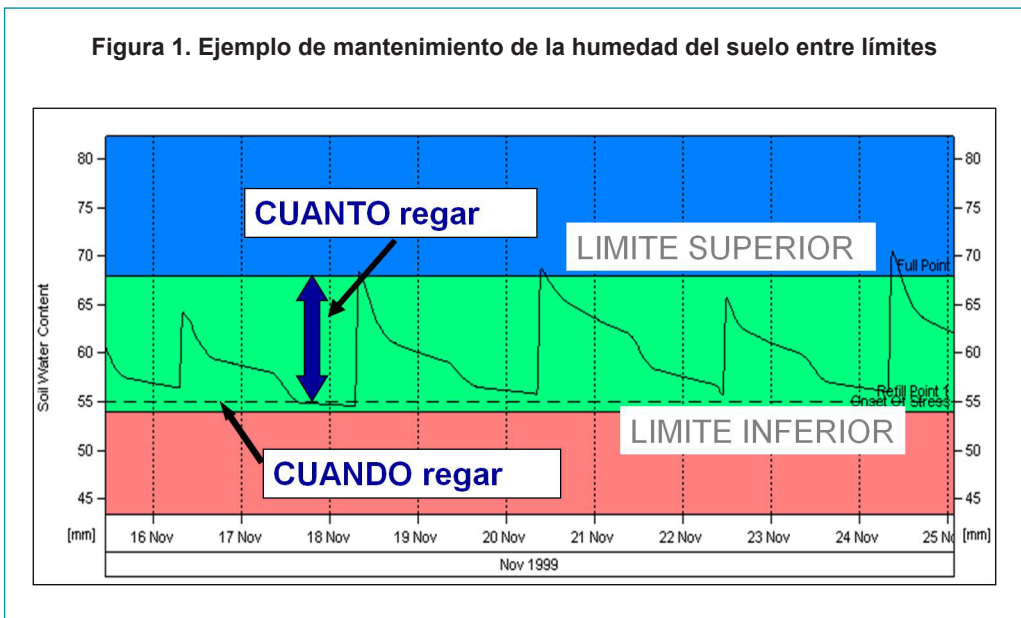
El manejo del riego con sensores se basa en mantener la humedad del suelo entre dos límites, uno inferior que indica los valores más secos del suelo cuando se debe iniciar el riego y un límite superior que indica los valores más húmedos que se permiten. La diferencia entre los dos límites es una indicación del volumen de riego requerido (Figura 1).

## Sensores que miden el potencial matricial del suelo

En condiciones no salinas, el  $Y_m$  es una buena aproximación al potencial hídrico total del suelo ( $Y_s$ ); el  $Y_m$  mide la fuerza con la que el agua es retenida por las partículas del suelo e indica la disponibilidad de agua del suelo para la planta. En condiciones salinas (en suelos o agua), el potencial osmótico puede contribuir apreciablemente al  $Y_s$ . La contribución de la salinidad a este potencial se maneja en campo de forma independiente. Algunos autores y fabricantes de equipos han indicado los límites superiores e inferiores entre los cuales debe encontrarse el  $Y_m$  en la zona radicular para la producción hortícola en suelo; se establecen diferencias entre la textura, la especie de cultivo y las condiciones evaporativas. En el caso de hortalizas bajo invernadero con riego de alta frecuencia, recomendaciones generales de los intervalos de  $Y_m$  son entre -10 y -20 kPa, -10 y -30 kPa, y -20 y -40 kPa para suelos de textura gruesa, media y fina respectivamente.

Hay dos grupos de sensores de potencial matricial que son relevantes para cultivos hortícolas protegidos: tensiómetros, y sensores de matriz granular. Los tensiómetros son baratos, simples y fáciles de utilizar. Requieren una preparación y mantenimiento adecuado para proporcionar datos exactos y fiables (Thompson y Gallardo, 2003). Hay (i) tensiómetros manuales en los cuales se obtienen datos a partir de la lectura visual

Figura 1. Ejemplo de mantenimiento de la humedad del suelo entre límites





de un vacuómetro, (ii) tensiómetros manuales con un interruptor para activar el equipo de riego cuando se alcance un valor predeterminado, y (iii) tensiómetros eléctricos que tienen transductores de presión que permiten medir continuamente y automáticamente los datos y que pueden actuar como controladores de riego. Los tensiómetros, normalmente tienen un rango de trabajo de 0 a -80 kPa. Este reducido rango es una limitación en algunos sistemas de cultivo, pero generalmente en cultivos hortícolas protegidos el  $Y_m$  se mantiene dentro de esos límites. Hay ciertas excepciones, cuando la demanda evaporativa y la superficie foliar son altas como por ejemplo en cultivo de melón en mayo-junio en el sureste español.

Los sensores de matriz granular son sensores de resistencia eléctrica y están formados por una matriz con dos electrodos. El más común es el Watermark (Irrrometer Co. California, USA). El agua dentro de la matriz se equilibra con la del suelo. La medida de la resistencia eléctrica entre los dos electrodos es una función del potencial matricial del suelo. Son sensores baratos, simples, fáciles de instalar con pocos requisitos de preparación y mantenimiento. El rango de medida es -10 a -200 kPa. El rango es más amplio que el de los tensiómetros pero no son muy fiables en suelos muy húmedos (0 a -10 kPa) y tienen una respuesta lenta en suelos que se secan rápidamente (Thompson *et al.*, 2006). En general son menos exactos que los tensiómetros pero necesitan menos atención por parte del usuario. Las lecturas se toman manualmente con un equipo lector o automáticamente y tienen una vida útil de 5-7 años.

**Figura 2. Un tensiómetro manual e instalado en suelo arenado, un sensor watermarky su lector**



## Sensores que miden el contenido volumétrico del agua en suelo

Del grupo de sensores que miden la humedad volumétrica del suelo ( $\Theta_v$ ) los más adecuados para sistemas de cultivo hortícolas de invernadero son los sensores dieléctricos (Thompson y Gallardo, 2003). Hay dos tipos (i) TDR (en inglés, Time Domain Reflectometry) y (ii) de capacitancia, o FDR (en inglés, Frequency Domain Reflectometry). Los sensores TDR, compuestos por barras de acero inoxidable de  $>10$  cm, se usan bastante en investigación. Los sensores de capacitancia, además de investigación se usan para el manejo de riego en aplicaciones comerciales. Los sensores de capacitancia se comercializan en varias configuraciones, p. ej. barras o anillos en varias profundidades (Thompson y Gallardo, 2003; Figura 3)

El sensor de capacitancia mas usado para el manejo del riego es el EnviroSCAN (Sentek Technologies, Australia) que consiste en varios sensores tipo anillo montados verticalmente en una sonda a varias profundidades (Figura 3). Este equipo registra datos continuos de humedad dando información detallada sobre la dinámica del agua en el suelo tanto en la zona radicular como por debajo. El EnviroSCAN es relativamente caro y sensible a cambios en salinidad del suelo (Thompson *et al.*, 2007a) lo cual limita su uso en sistemas donde se maneja la salinidad para aumentar la calidad del fruto.

Algunos sensores dieléctricos y tensiómetros se han usado para el manejo del riego en cultivos en sustrato (Thompson y Gallardo, 2003). Estos sensores dieléctricos incluyen el EnviroSCAN (Figura 3), WET sensor (Delta-T Devices, Reino Unido; Figura 3), sensor ECHO (Decagon Devices, EEUU), y sensor Grodan WCM Continuous Sensor (Grodan, Holanda). Los tensiómetros con una escala reducida p. ej. 0 a -40 kPa y respuesta rápida se han usado con sustratos artificiales y medios de cultivo como la arena.

**Figura 3. Sensores de capacitancia. Varios sensores EnviroSCAN dispuestos en una sonda, una sonda EnviroSCAN instalada en suelo, un sensor ECHO y el WET sensor con lector**



### 5.1.2. Programación del riego con sensores de planta

Los sensores de planta que mas aplicaciones tienen para el manejo del riego son: (i) sensores de diámetro de tallo, (ii) sensores de flujo de savia, y (iii) sensores de temperatura de hoja/cubierta (Gallardo y Thompson, 2003b). Los sensores de diámetro de tallo miden la contracción del tallo que ocurre durante el día en respuesta a la transpiración y el crecimiento del tallo; ambos parámetros son muy sensibles al estrés hídrico. En los últimos años ha habido mucha investigación con estos sensores en cultivos leñosos y cierta adopción en fincas comerciales. En cultivos hortícolas, estos sensores pueden ser indicadores de estrés hídrico; sin embargo en cultivos de ciclo corto, la tasa de crecimiento rápida hace mas difícil la interpretación de los datos; además su sensibilidad en la detección de estrés hídrico en cultivos de invernadero decrece en condiciones invernales de baja demanda evaporativa (Gallardo *et al.*, 2006). De manera similar, los sensores de flujo de savia que miden directamente la transpiración de la planta han sido objeto de investigación sobre todo en cultivos leñosos. Estos sensores debido a su elevado coste y complejidad técnica se han usado fundamentalmente en investigación y no existen muchas aplicaciones comerciales en horticultura para el manejo del riego. La diferencia de temperatura entre la hoja o el cultivo y el ambiente es también un indicador sensible al estrés hídrico. Se han propuesto varios indicadores para el riego basados en esta medida como el CWSI (“Crop Water Stress Index”), pero aunque hasta ahora no ha habido aplicaciones comerciales, actualmente se está trabajando en este método en combinación con teledetección. En general los sensores de planta han tenido menos aplicaciones prácticas para el manejo del riego que los sensores de suelo.

### 5.1.3. Consideraciones generales sobre sensores para el manejo de riego

Cuando se usan sensores para el manejo del riego hay que considerar (i) las repeticiones con un mínimo de 2-3 sensores para un cultivo dado y (ii) la localización de los sensores que debe ser representativa del cultivo. Otras consideraciones son el coste, facilidad de uso, preparación, mantenimiento, 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 y Gallardo, 2003). En general los sensores de suelo son mas 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. Los sensores de suelo de capacitancia son usados actualmente en fincas comerciales en otros países. Sin embargo dos limitaciones importantes son su coste y su elevada sensibilidad a la salinidad. Los tensiómetros son sensores muy adecuados para cultivos hortícolas de invernadero en suelo porque 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.

## 5.2. Programación del riego con datos climáticos

La programación del riego con datos climáticos se basa en la utilización expresiones matemáticas que, a partir de datos climáticos, permiten estimar el volumen de agua consumido por el cultivo o evapotranspiración del cultivo (ETc). Cuando se utilizan sistemas de riego por goteo, dada la elevada frecuencia de riegos se suele ignorar el papel del suelo como almacén de agua y se considera que el contenido de agua en el suelo no varía con el tiempo. Por tanto, bajo invernadero la programación del riego se simplifica y el proceso de programación se enfoca hacia cuanta agua hay que aplicar basándose en estimaciones de la ETc.

Los datos climáticos deben proceder de estaciones agrometeorológicas localizadas en áreas cultivadas donde los instrumentos se exponen a condiciones atmosféricas similares a las de los cultivos circundantes (Allen *et al.*, 1998). Además, hay que tener en cuenta que la precisión de las estimaciones del consumo de agua del cultivo no será superior a la de los datos climáticos empleados. Por tanto, antes de realizar estimaciones del consumo de agua del cultivo es muy recomendable que se evalúe la calidad de los datos climáticos para detectar errores. Se han desarrollado varios procedimientos que permiten evaluar la calidad de los datos climáticos de forma sencilla (Meek y Hatfield, 1994; Allen *et al.*, 1998).

### 5.2.1. Modelos para estimar las necesidades de agua de los cultivos

En los invernaderos con sistemas de control climático y cultivo en sustrato se han desarrollado modelos que permiten estimar la transpiración del cultivo a escala horaria o inferior (Stanghellini, 1987; Baille *et al.*, 1994; Medrano *et al.*, 2005). El uso de estos

modelos en invernaderos con bajo nivel tecnológico puede ser complejo porque es necesario disponer de: (i) datos climáticos horarios en tiempo real, (ii) datos referentes al cultivo, tales como la resistencia aerodinámica y el índice de área foliar, de los cuales hay poca información o son de difícil medición y (iii) hay que conocer como varían los parámetros de los modelos con las condiciones climáticas, especie y estado de desarrollo.

En los invernaderos sin control climático y bajo nivel tecnológico, sí además se usa el suelo como medio de cultivo, puede ser más aconsejable el uso de expresiones más sencillas. Se han propuesto relaciones empíricas entre la transpiración del cultivo y la radiación solar (de Villele, 1974) o entre la evapotranspiración del cultivo y la evaporación desde un Tanque Clase A (Castilla, 1986). Sin embargo, estas relaciones varían con las condiciones climáticas, especie cultivada y estado de desarrollo del cultivo, ya que los coeficientes de estas relaciones engloban tanto los efectos del clima y cultivo sobre la demanda de agua del cultivo.

El modelo de la FAO (Doorenbos y Pruitt, 1977) permite separar los efectos del clima y cultivo sobre el consumo de agua, lo que ha permitido su aplicación en distintas condiciones climáticas o de cultivo. Este modelo estima el consumo de agua del cultivo o evapotranspiración (ETc) (ec. 1) como el producto de la evapotranspiración de un cultivo de gramíneas de referencia (ETo), que cuantifica el efecto que tiene el clima sobre la demanda de agua del cultivo, y el coeficiente de cultivo (Kc), que depende del cultivo en cuestión, su estado de desarrollo y disponibilidad de agua en el suelo, sirve como una integración de las diferencias físicas y fisiológicas entre el cultivo y el cultivo de referencia.

$$ETc = ETo * Kc \quad [1]$$

Este modelo, ampliamente usado en cultivos al aire libre, ha sido calibrado y evaluado en la Estación Experimental de la Fundación Cajamar para su uso en los cultivos hortícolas bajo invernadero en el sudeste español (Fernández *et al.*, 2001; Orgaz *et al.*, 2005; Bonachela *et al.*, 2006; Fernández *et al.*, 2010).

Existen numerosas expresiones que permiten estimar la ETo a partir de datos climáticos, pero el método FAO-56 Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) se ha recomendado como método estándar de cálculo por su precisión tanto en climas áridos como húmedos. Este método requiere datos de radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento. Bajo invernadero en clima mediterráneo, este método ha proporcionado buena precisión cuando se utiliza un valor fijo de resistencia aerodinámica de

295 s m<sup>-1</sup> (Fernández *et al.*, 2010). Además, los métodos de Hargreaves y un método de radiación local también proporcionaron estimaciones precisas, y dado los pocos datos climáticos que requieren y su sencillez se recomiendan para su uso en estas condiciones (Fernández *et al.*, 2010). El método de radiación local permite la estimación de los valores de ETo bajo invernadero a partir de valores de radiación solar medida en exterior y de la transmisividad de la cubierta del invernadero, que es función del tipo de estructura, material de cerramiento, edad del plástico, etc. La principal ventaja de este método es la posibilidad de adaptar la dosis de riego a diferentes tipos de manejo (encalado o blanqueo, distintos tipos de sombreo), tipos de estructura de invernaderos y materiales de cerramiento a partir de la transmisividad de la cubierta.

Los valores de Kc de los principales cultivos en invernadero han sido determinados en las condiciones del sudeste de España (Fernández *et al.*, 2001; Orgaz *et al.*, 2005). También se ha desarrollado un modelo que estima los valores de Kc en función de la temperatura medida dentro de invernadero (Fernández *et al.*, 2001; Orgaz *et al.*, 2005), lo que ofrece un método simple para adaptar las dosis de riego a diferentes condiciones climáticas o fechas de plantación.

Utilizando el modelo de la FAO adaptado a invernadero 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 de radiación solar exterior y temperatura de dentro de invernadero de una serie histórica de más de veinte años (Figura 4). El objetivo es proporcionar a técnicos y agricultores herramientas que les permita optimizar los aportes de riego a los cultivos hortícolas bajo invernadero, y que además sean fácilmente utilizables.

**Figura 4. PrHo: Programa de Riegos para cultivos Hortícolas y publicación elaborada por la Estación Experimental de la Fundación Cajamar con las recomendaciones de riego para los cultivos hortícolas**



## 6. Problemas medioambientales asociados con el riego

Los problemas medioambientales asociados al riego en el sistema de producción de hortalizas bajo invernadero de Almería son: (i) contaminación de acuíferos con nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), (ii) sobreexplotación de acuíferos profundos, (iii) ascenso del nivel freático del acuífero superficial del Campo de Dalías, y (iv) intrusión salina en el acuífero del Campo de Dalías. Obras de ingeniería como la construcción de plantas desaladoras y el bombeo del agua desde la Balsa del Sapo pueden ofrecer soluciones al menos parciales sobre estos últimos aspectos. La reducción de la contaminación con  $\text{NO}_3^-$  del acuífero requiere cambios en las prácticas de manejo del riego y la fertilización.

### 6.1. El problema de los nitratos y su relación con la actividad agrícola

La contaminación de los acuíferos con nitratos es consecuencia de la lixiviación de  $\text{NO}_3^-$  desde sistemas agrícolas. Los acuíferos que reciben drenajes de ecosistemas naturales tienen concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  muy bajas  $<5 \text{ mg NO}_3^-/\text{L}$ . La lixiviación de nitratos consiste en el transporte vertical de nitratos disueltos en el agua de drenaje y está asociado al uso de fertilizantes nitrogenados en agricultura siendo común en la agricultura de regadío. La contaminación de acuíferos con nitratos es un tema de salud pública.

El consumo de aguas con nitratos puede inducir la enfermedad metahemoglobinemia, también conocida como “síndrome de los bebés azules” que afecta a niños pequeños. Por ello, existe legislación que limita la concentración de  $\text{NO}_3^-$  de las aguas potables, siendo la máxima concentración permitida por la Unión Europea (UE) de  $50 \text{ mg NO}_3^-/\text{L}$ .

## 6.2. Legislación sobre nitratos en la agricultura

La Directiva Nitratos de la UE (Directiva 91/676/CEE del Consejo de 12 de diciembre de 1991) establece un nivel máximo de  $50 \text{ mg NO}_3^-/\text{L}$  en todas las aguas subterráneas y superficiales de la UE. Cuando la concentración de nitratos excede este límite, las zonas asociadas son declaradas ‘Zonas Vulnerables a la contaminación por Nitratos (ZVN)’, en las cuales se deben adoptar ‘programas de actuación’ encaminados a la reducción de la contaminación por nitratos de origen agrario. Aproximadamente el 40 % de la superficie de la UE-27 ha sido declarada ZVN. La directiva de nitratos ha sido incorporada dentro de la Directiva Marco de Agua (Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000) que incumbe todos los aspectos relacionados con la calidad de los recursos hídricos naturales y tiene como objetivo que la contaminación de las aguas sea mínima para el año 2000. En España, esta directiva es implementada a nivel de comunidades autónomas. En el Decreto 36/2008 de 5 de febrero se designan 22 zonas vulnerables a la contaminación por nitratos de origen agrario en Andalucía, que en Almería incluyen el Campo de Dalías, Bajo Andarax, y Campo de Níjar. La Orden de 18 de noviembre de 2008 contiene los planes de actuación aplicables en las ZVN en Andalucía. Entre las prácticas requeridas están determinar la cantidad de fertilizantes nitrogenados (N) aplicados en función a la producción esperada, limitar el N aplicado en el estiércol, y llevar un cómputo de las aplicaciones de N de los cultivos registrándolas en “hojas de fertilización nitrogenada”.

## 6.3. Prácticas agrícolas que contribuyen a la lixiviación de nitratos

La elevada lixiviación de  $\text{NO}_3^-$  está asociada a aplicaciones de fertilizantes N excesivas y a la ocurrencia de drenaje cuando el riego excede las necesidades hídricas del cultivo. Suelos de textura gruesa que drenan fácilmente y condiciones climáticas donde



son frecuentes las lluvias torrenciales en cultivos al aire libre favorecen la lixiviación de nitratos. Las aplicaciones excesivas de N ocurren cuando la aplicación de N disponible para la planta ( $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$ ) excede claramente la extracción de N posible por un cultivo. El suministro de N incluye el N aplicado como fertilizantes N, el N mineralizado desde el estiércol y desde el N orgánico del suelo y el N mineral residual desde cultivos precedentes.

En cultivos en invernaderos de Almería en suelo, el drenaje está asociado con riegos excedentarios durante el periodo de establecimiento tras el trasplante y riegos de elevado volumen durante la desinfección/solarización y riegos pre-trasplante (Thompson *et al.*, 2007b). La fertilización excedentaria de N es consecuencia de aplicar programas de fertilización fijos que generalmente no consideran otras fuentes de N como las elevadas aplicaciones de estiércol (Thompson *et al.*, 2007b). Desde cultivos en sustratos a solución perdida en invernaderos, ocurren pérdidas de  $\text{NO}_3^-$  elevadas porque se suele drenar como mínimo el 20-30 % de la solución de riego.

#### 6.4. Prácticas agrícolas para un manejo óptimo de la fertilización nitrogenada

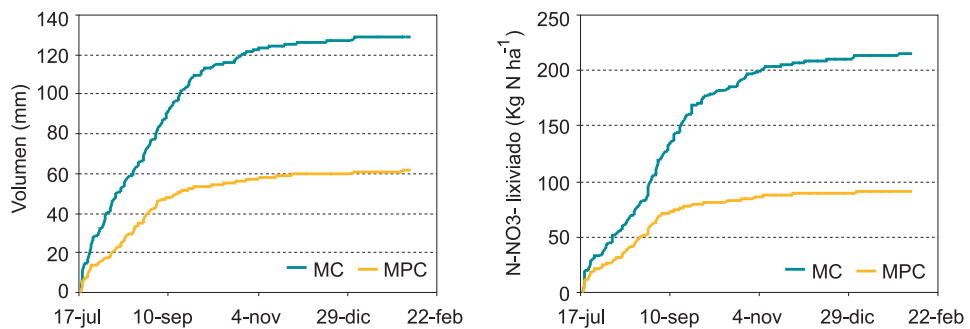
En varios estudios se han desarrollado prácticas de manejo de riego y fertilización nitrogenada, en cultivos intensivos, para minimizar las pérdidas de nitratos optimizando producción y calidad (Granados *et al.*, 2007). En primer lugar se consideran prácticas de manejo prescriptivas, considerando volúmenes de riego y aporte de N ajustados a la demanda del cultivo, obtenidos mediante modelización utilizando la información de cultivos desarrollados anteriormente bajo condiciones similares. En segundo lugar se propone considerar un manejo correctivo, mediante el uso de sensores que indican el estado de humedad y concentración de nitratos en el suelo durante el desarrollo del cultivo (Granados *et al.*, 2007).

En 2006 se desarrolló un cultivo de pimiento en la Estación Experimental de la Fundación Cajamar. La prescripción de las necesidades de riego se basaron en la evapotranspiración del cultivo (Fernández *et al.*, 2001), y la prescripción del N absorbido por la planta en el modelo Nup desarrollado por Granados (2011). Para el manejo correctivo se utilizaron tensiómetros para mantener una humedad adecuada en el suelo, y sondas de succión para mantener constante la concentración de nitratos en la solución de suelo

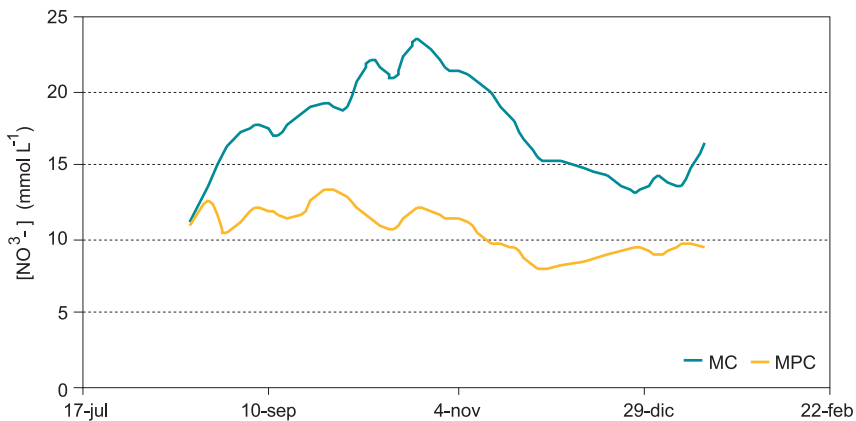
y un nivel de salinidad adecuado, durante el desarrollo del cultivo. Como resultado se redujo el volumen de riego desde 355 mm en el tratamiento convencional (MC) hasta 296 mm en el tratamiento con manejo prescriptivo-correctivo (MPC), y una reducción del volumen drenado de casi un 50 % (Figura 5). El uso de prácticas prescriptivas-correctivas de riego y aporte de N supuso una reducción de 176 kg N ha<sup>-1</sup> en el N aportado, lo que equivale a un 35 % del N aportado en el tratamiento convencional. La concentración de nitratos en el drenaje del cultivo con tratamiento mejorado fue 8,5-12 mmol L<sup>-1</sup>, mientras que en el tratamiento convencional alcanzó hasta 19 mmol L<sup>-1</sup>, y se redujo de manera importante la cantidad de nitrato perdida por lixiviación, hasta un 40 % respecto al tratamiento convencional (Figura 5).

Considerando, como método de monitorización del estado de N en el suelo, el uso de sondas de succión, la concentración de nitratos en la solución del suelo se mantuvo en 8-12 mmol L<sup>-1</sup>, durante la mayor parte del periodo de cultivo, mientras que en el tratamiento convencional se mantuvo en 14-24 mmol L<sup>-1</sup> (Figura 6). La producción de fruto, biomasa y absorción de N en el tratamiento con un manejo prescriptivo-correctivo fue similar a la obtenida en el tratamiento convencional, indicando que concentraciones de 8-12 mmol L<sup>-1</sup> en la solución del suelo no son limitantes para el desarrollo del cultivo, y que es posible ajustar el aporte de N a las necesidades del cultivo, obteniendo una importante reducción de nitrato perdido por lixiviación.

**Figura 5. Volumen acumulado de agua drenada y cantidad acumulada de nitrógeno en forma de nitrato (NO<sup>3</sup>-N) lixiviado en el tratamiento prescriptivo-correctivo (MPC) y convencional (MC)**



**Figura 6. Concentración de nitratos [NO<sub>3</sub><sup>-</sup>] en la solución del suelo a 15 cm de profundidad en el tratamiento prescriptivo-correctivo (MPC) y convencional (MC)**



## Referencias Bibliográficas

- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D. y Smith, M. (1998): “Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements”; FAO Irrigation and Drainage, Roma, FAO; p. 56.
- Baille, M.; Baille, A. y Laury, J. C. (1994): “A simplified model for predicting evapotranspiration rate of nine ornamental species vs. climate factors and leaf area”; en *Scientia Horticulturae* (59); pp. 217-232.
- Bonachela, S.; González, A. M. y Fernández, M. D. (2006): “Irrigation scheduling of plastic greenhouse vegetable crops based on historical weather data”; *Irrig. Sci.*, (25); pp. 53-62.
- Bonachela, S.; Acuña, A. R. y Casas, J. (2007): “Environmental factors and management practices controlling oxygen dynamics in agricultural irrigation ponds in a semiarid Mediterranean region: Implications for pond agricultural functions”; en *Water Res.* (41); pp. 1225-1234.

- Carreño, J.; Aguilar, J. y Moreno, S. M. (2000): “Gastos de agua y cosechas obtenidas en los cultivos protegidos del campo de Níjar (Almería)”; *XVIII Congreso Nacional de Riegos*. Huelva, 20 al 22 de junio de 2000.
- Castilla, N. (1986): “Contribución al estudio de los cultivos enarenados en Almería: Necesidades hídricas y extracción de nutrientes del cultivo de tomate de crecimiento indeterminado en abrigo de polietileno”. Universidad Politécnica de Madrid.
- Céspedes, A. J.; García, M. C.; Pérez-Parra, J. J. y Cuadrado, I. M. (2009): “Caracterización de la explotación protegida almeriense”. Almería, FIAPA, Fundación Cajamar.
- Casas, J. J.; Toja, J.; Bonachela, S.; Fuentes, F.; Gallego, I.; Juan, M.; León, D.; Peñalver, P.; Pérez, C. y Sánchez, P. (2011): “Artificial ponds in a Mediterranean region (Andalusia, southern Spain): agricultural and environmental issues”; *Water and Environ. J.* (25-3); pp. 308-317.
- De Villele, O. (1974): “Besoins en eau des cultures sous serre. Essai de conduite des arrosages en fonction de l’ensoleillement”; en *Acta Hortic.*, (35); pp. 123-129.
- Doorenbos, J. y Pruitt, W. O. (1977): “Las necesidades de agua de los cultivos”. *FAO Riego y drenaje*, (24), Roma, FAO.
- Fernández, M. D.; Orgaz, F.; Fereres, E.; López, J. C.; Céspedes, A.; Pérez, J.; Bonachela, S. y Gallardo, M. (2001): “Programación del riego de cultivos hortícolas bajo invernadero en el sudeste español”. Almería, Cajamar (Caja Rural Intermediterránea).
- Fernández, M. D.; González, A. M.; Carreño, J.; Pérez, C. y Bonachela, S. (2007): “Analysis of on-farm irrigation performance in Mediterranean greenhouses”; *Agric. Water Manage.*, (89); pp. 251–260.
- Fernández, M. D.; Céspedes, A. y González, A. M. (2008): “PrHo V. 2.0: Programa de Riego para cultivos Hortícolas en invernadero”. *Documento Técnico (1)*. Almería, Fundación Cajamar.

- Fernández, M. D.; Bonachela, S.; Orgaz, F.; Thompson, R. B.; López, J. C.; Granados, M. R.; Gallardo, M. y Fereres, E. (2010): “Measurement and estimation of plastic greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate”; en *Irrig. Sci.*, (28); pp. 497-509.
- Gallardo, M. y Thompson, R. B. (2003a): “Relaciones hídricas en suelo y planta”; 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. 71-94.
- Gallardo, M. y Thompson, R. B. (2003b): “Uso de los sensores de planta para la programación del riego”; 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. 353-374.
- Gallardo, M.; Thompson, R. B.; Valdez, L. C. y Fernández, M. D. (2006): “Response of stem diameter variations to water stress in greenhouse-grown vegetable crops”; *Journal of Horticultural Science&Biotechnology*, (81); pp. 483-495.
- Granados, M. R.; Thompson, R. B.; Fernández, M. D.; Gázquez-Garrido, J. C.; Gallardo, M. y Martínez-Gaitán, C. (2007): “Reducción de lixiviación de nitratos y manejo mejorado de nitrógeno con sondas de succión en cultivos hortícolas”; *Colección Agricultura*, Fundación Cajamar, Almería.
- Granados, 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.
- Lorite, I. J.; Mateos, L. y Fereres, E. (2004): “Evaluating irrigation performance in a Mediterranean environment. II. Variability among crops and farmers”; *Irrig. Sci.*, (23); pp. 85–92.
- Lupiañez, N. (2009): “Caracterización y evaluación de instalaciones de riego localizado del Campo de Dalías”. *Proyecto Fin de Carrera*, Universidad de Almería.

- Martínez Álvarez, V.; Calatrava Leyva, J.; Maestre Valero, J. F. y Martín Górriz, B. (2009): "Economic assessment of shade-cloth covers for agricultural irrigation reservoirs in a semi-arid climate"; *Agric. Water Manage.* (96); pp. 1351-1359.
- Merriam, J. L. y Keller, J. (1978): "Farm Irrigation System Evaluation"; Utah, State University.
- Malano, H. y Burton, M. (2000): "Guidelines for Benchmarking Performance in the Irrigation and Drainage Sector"; *IPTRID Secretariat, FAO*, Rome.
- Medrano, E.; Lorenzo, P.; Sánchez-Guerrero, M. C. y Montero, J. I. (2005): "Evaluation and modelling of greenhouse cucumber-crop transpiration under high and low radiation conditions"; *Scientia Hortic.* (105); pp. 163-175.
- Meek, D. W. y Hatfield, J. L. (1994): "Data quality checking for single station meteorological databases"; *Agricultural and Forest Meteorology* (69); pp. 85-109.
- Orgaz, F.; Bonachela, S.; Cuevas, R.; De Los Rios, E.; Montero, J. I.; Castilla, N. y Fereres, E. (1986): "Evaluación de sistemas de riego localizado en cultivos bajo invernadero en Almería"; *II Congreso Nacional de la S.E.C.H. 21-25/04/1986*, Córdoba, España.
- Orgaz, F.; Fernández, M. D.; Bonachela, S.; Gallardo, M. y Fereres, E. (2005): "Evapotranspiration of horticultural crops in an unheated plastic greenhouse"; *Agric. Water Manage.* (72); pp. 81-96.
- Peña, M. T. (2009): "Estimación a escala regional de los flujos de agua y la lixiviación de nitratos en el Campo de Dalías"; *Proyecto Fin de Carrera*, Universidad de Almería.
- Sánchez-Martos, F.; Pulido-Bosch, A. y Calaforra, J. M. (1999): "Hydrogeochemical processes in an arid region of Europe (Almería, SE Spain)"; *Applied Geochemistry* (14); pp. 735-745.
- Stanghellini, C. (1987): "Transpiration of greenhouse crops: an aid to climate management"; *Ph.D. Dissertation*. Wageningen Agricultural University, The Netherlands.

- Thompson, R. B. y Gallardo, M. (2003): “Programación de riegos mediante sensores de humedad en suelo”; 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-Gaitán, C. (2007a): “Salinity effects on soil moisture measurement made with a capacitance sensor”; en *Soil Science Society of America Journal* (71); pp. 1647-1657.
- Thompson, R. B.; Martínez-Gaitán, C.; Gallardo, M.; Giménez, C. y Fernández, M. D. (2007b): “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); pp. 261-274.

