

Estado de la cuestión del riego por goteo enterrado: Diseño, manejo, mantenimiento y control de la salinidad del suelo

R. Salvador^{*,1} y R. Aragüés^{**1}

* Departamento de Suelo y Agua, Estación Experimental de Aula Dei (CSIC), Avda. Montañana 1005, 50059 Zaragoza, España

** Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA), Diputación General de Aragón (DGA), Unidad de Suelos y Riegos (Unidad Asociada EEAD-CSIC), Avenida Montañana 930, 50059 Zaragoza, España

Resumen

El riego por goteo enterrado (RGE) ha despertado en los últimos años un interés creciente en España debido a que su baja presión de trabajo y su menor coste energético, junto con otras potenciales ventajas comparativas, puede hacerlo más rentable que otros sistemas de riego (aspersión en particular). Este trabajo revisa las principales ventajas y limitaciones del RGE, con un énfasis particular en los problemas de diseño, manejo y mantenimiento del sistema, así como en la salinización potencial del suelo superficial en zonas áridas o semiáridas regadas con aguas de baja calidad. El RGE bien diseñado, manejado y mantenido, ha demostrado ser rentable y sostenible. Sin embargo, el RGE tiene inconvenientes relacionados con las características del agua de riego, del suelo y de los cultivos que pueden comprometer su sostenibilidad y rentabilidad. Las ventajas y limitaciones del RGE deben por lo tanto evaluarse en cada caso particular con el objetivo de proporcionar recomendaciones sólidas a los agricultores.

Palabras clave: Riego por goteo enterrado, calidad del agua, textura, salinidad, germinación.

Abstract

State of the art of subsurface drip irrigation: Design, management, maintenance and soil salinity control

Subsurface drip irrigation (SDI) has attracted an increasing interest in Spain in the last years due to its low operating pressure and lower energy cost that, coupled to other potential advantages, can make it more profitable than other irrigation systems (sprinkler systems in particular). This work reviews the main benefits and constraints of SDI, with special emphasis on design, management and maintenance problems, as well as on the potential salinization of surface soils in arid and semiarid areas irrigated with low quality waters. Well designed, operated and maintained SDI systems have shown to be profitable and sustainable. Nevertheless, SDI has drawbacks in relation to certain irrigation water, soil and crop characteristics that can jeopardize its sustainability and profitability. Therefore, the advantages and limitations of SDI must be evaluated on a case-by-case basis with the objective of providing solid recommendations to farmers.

Key words: Subsurface drip irrigation, water quality, texture, salinity, germination.

1. Autores para correspondencia: rsalvador@eead.csic.es; raragues@aragon.es

DOI: pendiente

Introducción

El riego por goteo enterrado (RGE) consiste en la aplicación de agua de forma localizada bajo la superficie del suelo por medio de emisores con caudales de descarga similares a los del goteo superficial. Este sistema ha despertado en los últimos años un interés creciente entre los agricultores debido principalmente a que trabaja a baja presión y, por lo tanto, consume menos energía que el riego por aspersión.

El RGE se viene utilizando desde hace más de cuatro décadas en diversos lugares del mundo (Camp, 1998). Así, hacia 1970 se realizaron las primeras instalaciones comerciales en plantaciones de azúcar en EEUU. Posteriormente, el RGE fue aplicado en una gran variedad de cultivos incluyendo cítricos, caña de azúcar, piña, algodón, hortalizas, frutales, aguacate, maíz y patata. En los primeros años 80 aumentó el interés por el RGE debido al descenso en los precios del material utilizado y al aumento en los precios de los fertilizantes. A partir de mediados de los años 80 comenzaron a publicarse artículos con información sobre la profundidad de instalación y espaciamiento de los laterales, la inyección de fertilizantes, el rendimiento de los cultivos, las necesidades de agua y de filtración, y comparaciones con otros sistemas de riego.

Este artículo resume la información más relevante existente sobre este sistema de riego, con un énfasis particular sobre las ventajas y limitaciones relacionadas con su diseño y mantenimiento, la implantación de cultivos y el control de la salinidad.

Ventajas a inconvenientes del RGE frente a otros sistemas de riego

El RGE presenta ventajas e inconvenientes que es necesario conocer para una toma de decisiones óptima cuando existen distintos

sistemas de riego disponibles (Lamm y Camp, 2007). Las Tablas 1 y 2 resumen respectivamente estas ventajas y limitaciones. En los siguientes apartados se discuten las más relevantes, haciendo énfasis en los principales inconvenientes que pueden en ciertos casos comprometer la sostenibilidad y viabilidad económica de este sistema de riego.

Diseño y manejo del RGE

El diseño correcto de la instalación en RGE es uno de los puntos más importantes debido a las dificultades prácticamente insalvables para modificar una instalación que en su mayor parte está enterrada. Por ello, es necesario optimizar tanto las características del cabezal de riego como las del sistema enterrado.

La topografía y tamaño de la parcela condicionan el diseño de este sistema que en principio es más adecuado para parcelas pequeñas o medianas sin pendiente o con pendientes moderadas. No es recomendable que la pendiente de las líneas de gotero sea mayor del 2%, en cuyo caso será necesaria la utilización de goteros autocompensantes para minimizar las diferencias de caudal entre el primer y último gotero.. Este sistema de riego no está aconsejado en parcelas con ondulaciones importantes (Lamm et al., 2003).

El cabezal de riego debe tener en cuenta las necesidades de filtrado, que dependen de la calidad del agua de riego, de las características de los goteros y del tamaño máximo de partículas que soporten los mismos sin obtenerse. Aunque el riego por goteo requiere presiones de funcionamiento relativamente bajas, el lavado de los filtros puede exigir presiones muy superiores.

En el diseño del riego en parcela hay que tomar decisiones sobre los componentes a instalar que conllevan ventajas e inconvenientes, por lo que es recomendable utilizar

Tabla 1. Resumen de las ventajas potenciales del RGE respecto a otros sistemas de riego citadas por Siefert et al. (1975), Phene et al. (1987), Phene (1990), Lamm et al. (1995), Hutmacher et al. (1996), Camp (1998), Ayars et al. (1998, 1999, 2001), Ayers et al. (1999), Oron et al. (1999), Thompson et al. (2002), Tingwu et al. (2003), Hanson y May (2004), Lamm y Camp (2007) y Thompson et al. (2010). Algunas de estas ventajas son comunes al riego por goteo superficial

Table 1. Summary of potential advantages in using subsurface drip irrigation (SDI) as reported by Siefert et al. (1975), Phene et al. (1987), Phene (1990), Lamm et al. (1995), Hutmacher et al. (1996), Camp (1998), Ayars et al. (1998, 1999, 2001), Ayers et al. (1999), Oron et al. (1999), Thompson et al. (2002), Tingwu et al. (2003), Hanson and May (2004), Lamm and Camp (2007) and Thompson et al. (2010)

-
- 1 **Aumento de la eficiencia en el uso del agua de riego** debido a (1) mayor producción de los cultivos sin incremento en la aplicación de agua, (2) reducción de los usos no beneficiosos del agua (evaporación, escorrentía superficial, percolación profunda), (3) mayor uniformidad y eficiencia del riego, y (4) mayor infiltración y almacenamiento de agua en suelos más secos y menos encostrados.

 - 2 **Reducción del volumen de riego aplicado** (especialmente en zonas áridas y frente a sistemas de riego que mojan toda la superficie del suelo) excepto si se utiliza para la germinación, emergencia e implantación del cultivo.

 - 3 **Independencia de las condiciones meteorológicas (viento y elevadas temperaturas) para el riego**, al contrario que en riego por aspersión.

 - 4 **Mejor manejo de fertilizantes y pesticidas** que se inyectan al sistema localizándose en el lugar momento más adecuados, lo que aumenta su eficacia y reduce las pérdidas por lavado (especialmente en el caso del nitrógeno).

 - 5 **Menores efectos externos sobre la calidad de las aguas** debido a que la aplicación de riegos frecuentes y ligeros reduce el lavado de nutrientes y agroquímicos por debajo de la zona de raíces.

 - 6 **Reducción de la percolación profunda** y de la recarga de las aguas subterráneas, menor ascenso de los freáticos y menor salinización del suelo en áreas afectadas por freáticos superficiales salinos.

 - 7 **Mayor posibilidad de utilización de aguas residuales** (especialmente en jardines) debido a la reducción del movimiento de patógenos, olores y contacto con humanos y animales. Además, la aplicación de efluentes biológicos con este sistema puede reducir las necesidades de tratamiento de las aguas.

 - 8 **Mejora de la sanidad de los cultivos** y reducción de las enfermedades causadas por patógenos, hongos y bacterias debido a menores valores de humedad en el entorno del cultivo.

 - 9 **Mejor control y reducción del crecimiento de malas hierbas** debido a la menor humedad de la superficie del suelo. Consecuentemente, hay una reducción en el empleo de herbicidas, maquinaria (ahorro de combustible) y personal.

 - 10 **Mejor utilización de aguas de riego salinas** en comparación con el riego por superficie debido a una distribución de sales más adecuada en la zona de raíces de los cultivos.

 - 11 **Incremento en el rendimiento y calidad de la producción** y mayores oportunidades de obtener dobles cosechas en muchos cultivos (aunque en la mayoría de los casos los incrementos son solo del orden del 20% o inferiores).

 - 12 **Mejora de la eficiencia y gestión de las operaciones agrícolas** ya que muchas de ellas pueden realizarse durante el riego. Estas operaciones, al llevarse a cabo en el suelo con la superficie seca, resultan en una menor compactación y encostramiento del suelo.

-
- 13 **Menores presiones operacionales y costes energéticos** que en algunos tipos de riego por aspersión.
 - 14 **Mayor ahorro de energía** debido a la reducción en el tráfico de maquinaria y, en algunos casos, a la reducción en las aplicaciones de agua, fertilizantes y pesticidas.
 - 15 **Menores componentes mecanizados** que en el riego por aspersión con sistemas desplazables. La mayor parte de los componentes son plásticos y resistentes a la corrosión.
 - 16 **Mayor flexibilidad de diseño** y adaptabilidad al tamaño y forma de las parcelas que en los equipos pivote. Menores limitaciones en cuanto a la pendiente del terreno que en riego por superficie.
 - 17 **Mayor longevidad (>10 años) en sistemas bien diseñados y mantenidos.** Al ser un sistema enterrado se encuentra protegido de la radiación solar, cambios bruscos de temperaturas, daños de animales y vandalismo.
 - 18 **Mayor rentabilidad,** aunque depende en gran medida de las condiciones y restricciones locales, especialmente en relación con la disponibilidad y coste del agua.
-

Tabla 2. Resumen de las limitaciones potenciales del RGE respecto a otros sistemas de riego citadas por Camp (1998), Rogers et al. (2003), Lamm y Camp (2007), Hanson et al. (2008), Roberts et al. (2008), Thompson et al. (2010) y Hanson (2012)

Table 2. Summary of potential disadvantages in using subsurface drip irrigation (SDI) as reported by Camp (1998), Rogers et al. (2003), Lamm and Camp (2007), Hanson et al. (2008), Roberts et al. (2008), Thompson et al. (2010) and Hanson (2012)

-
- 1 **Los errores de diseño son difíciles de resolver** porque la mayor parte del sistema está enterrado. Dificultad en monitorizar y evaluar los eventos de riego y el mal manejo del sistema, lo que puede provocar una deficiente uniformidad de distribución del agua, zonas infra- y sobre-regadas, deficiente aireación del suelo, menores rendimientos y elevadas pérdidas de percolación profunda.
 - 2 **Tamaño limitado del bulbo húmedo,** particularmente en suelos de textura gruesa, que puede restringir el desarrollo radicular y hacer críticos tanto el calendario de riego como la dosis de agua y fertilizantes.
 - 3 **Descarga de los emisores superior a la capacidad del suelo para redistribuir el agua aplicada,** alterando los flujos y provocando flujos preferenciales y surgencias de agua en la superficie del suelo.
 - 4 **Insuficiente movimiento del agua hacia la superficie del suelo,** especialmente en suelos de textura gruesa, limitando la germinación y establecimiento de los cultivos y aumentando las necesidades de aplicación de agua para lograr una humedad óptima en la cama de siembra.
 - 5 **Acumulación de sales** sobre las líneas portagoteros y, particularmente, cerca de la superficie del suelo, perjudicando la germinación y emergencia de las plántulas. En ausencia de lluvias que laven las sales, su progresiva acumulación puede limitar seriamente la producción de cultivos sembrados en años sucesivos en estas zonas salinizadas.
 - 6 **Laboreo del suelo limitado por la profundidad de instalación de las líneas portagoteros.** Las líneas superficiales pueden dañarse y/o aplastarse por el tráfico de maquinaria agrícola durante el cosechado, en particular en condiciones de suelo húmedo.
 - 7 **Dificultad de acomodación de cultivos con distintos espaciamientos entre filas a la distancia fija entre las líneas portagoteros.** Algunos cultivos pueden necesitar espaciamientos entre líneas portagoteros tan pequeños que resultan económicamente inviables.
-

-
- 8 **Elevada necesidad de filtrado y manejo complejo de la calidad** del agua debido a que no existe la oportunidad de una limpieza manual de los emisores.
-
- 9 **Operaciones de mantenimiento de la instalación muy elevadas**, entre las que se incluyen el control estricto de fugas, los tratamientos preventivos para impedir la intrusión de raíces en los goteos, los lavados periódicos de las partículas de suelo y otros precipitados acumulados en las líneas portagoteros, y la instalación de válvulas antivacío capaces de evacuar el aire de las tuberías. Todo ello aumenta los costes operacionales que pueden comprometer la viabilidad económica del sistema.
-
- 10 **Mayor coste inicial de la inversión que en riego por aspersión** (cobertura total y sobre todo pivotes), en especial en parcelas medianas y grandes con topografía regular. Los costes pueden ser en torno a un 50% mayores que los de una cobertura total. Esto hace que el sistema sea difícil de rentabilizar si hay poca disponibilidad de agua o energía o si los cultivos no tienen una alta productividad económica.
-
- 11 **Problemas ecológicos a la hora de abandono de las líneas portagoteros**. No está resuelto el procedimiento para eliminar los restos del goteo enterrado de una parcela.
-

programas de simulación que ayuden a tomar el conjunto de decisiones más adecuadas para cada instalación individual (Rodríguez y Gil, 2012). Las consideraciones más importantes a tener en cuenta son:

1. **Grosor de la línea portagoteros:** Las líneas portagoteros con paredes más gruesas tienen un coste superior, pero son mucho más resistentes frente a roturas accidentales en el laboreo o aplastamientos por el paso de maquinaria o por colapso del terreno. Un aplastamiento de la tubería producirá una falta de uniformidad o incluso la ausencia de riego en la parte de la línea portagoteros posterior a la zona aplastada. La disolución de minerales solubles como el yeso puede asimismo provocar cárcavas que favorecen el aplastamiento o rotura de las líneas.
2. **Longitud de la línea portagoteros:** La longitud máxima determina la variación entre los caudales de los emisores. Una diferencia de caudal entre el primer y último emisor del 10% es la más deseable, entre el 10 y 20% es tolerable y valores más altos son inaceptables. Cuanto mayor es la longitud de las líneas, más económica es la instalación, por lo que es necesario llegar a un compromiso razonable entre economía y calidad del riego para cada una de las parcelas. Se recomienda ser conservador con los datos de pérdidas de carga proporcionados por los fabricantes y reservar un margen de pérdida de carga disponible a la hora de seleccionar la longitud de las tuberías a instalar.
3. **Profundidad de la línea portagoteros:** La profundidad ideal depende de la estructura y textura del suelo, del patrón de desarrollo de las raíces, de la profundidad de los aperos a emplear, de la permanencia de un mismo cultivo en la parcela y, principalmente, de si el RGE se va a utilizar o no para la germinación y nascencia del cultivo (Charlesworth y Muirhead, 2003). Conforme mayor es la profundidad de instalación, menores son las posibilidades de intrusión de raíces y de aplastamiento de las líneas, pero mayores son las dificultades para la germinación óptima de las semillas, que requieren mayores dosis de riego, produciendo mayores pérdidas de agua (y fertilizantes) por percolación profunda. Según Camp (1998), la profundidad de la línea portagoteros puede encontrarse entre 0,02 y 0,70 m. Como norma general, se recomiendan pro-

fundidades de entre 0,40 y 0,45 m en suelos de textura arcillosa y de 0,25-0,35 m en suelos con textura más arenosa (Lamm et al., 2003). Si la germinación se produce con RGE, se recomiendan profundidades de entre 0,20 y 0,30 m, aunque ello favorece la aparición de malas hierbas que aumentan el gasto en herbicidas y provoca una mayor evaporación de agua desde la superficie del suelo húmedo y una mayor salinización potencial del suelo superficial. Estos problemas han conducido a que más del 90% de los agricultores encuestados en California utilicen el riego por aspersión en lugar del RGE para la germinación e implantación del cultivo (Burt y Styles, 1994).

4. Espaciamiento de la línea portagoteros:

El mejor espaciamiento es el que coincide con el espaciamiento entre las líneas del cultivo, de tal manera que la línea portagoteros se disponga en la vertical de la línea del cultivo. Si este espaciamiento no es económicamente viable, se recomienda disponer una línea portagoteros entre cada dos líneas de cultivo. Cuanto mayor es el espaciamiento, menor es en general el rendimiento del cultivo. Un espaciamiento de 1.5 m entre líneas portagoteros es el más recomendable en términos económicos (Camp, 1998), excepto en cultivos que cubren toda la superficie del suelo en los que el espaciamiento no debe superar 1 m (Charlesworth y Muirhead, 2003).

5. Distancia entre goteros:

esta distancia viene determinada por el tipo (textura) de suelo, el espaciamiento entre plantas y la calidad del agua de riego. Esta distancia debe ser menor en suelos de textura gruesa, plantas menos espaciadas y aguas de riego de elevada salinidad. Generalmente, para distancias entre líneas dentro de lo aconsejable, la distancia entre goteros se encuentra entre 0,3 y 0,6 m.

6. Goteros:

La obturación de los goteros es la razón más importante de fallo del sistema

(Lamm et al., 2003) ya que al estar embutidos en las líneas portagoteros enterradas no es posible su sustitución. Por este motivo, se han de seleccionar emisores con paredes algo mayores que las que se instalarían en superficie. Se debe encontrar el óptimo económico entre calidad (y precio) de los goteros y la separación entre ellos para conseguir una instalación robusta sin perder demasiada uniformidad de riego. Los goteros deben ser autocompensantes y antisucción. Algunos instaladores prefieren goteros de alto caudal porque son menos sensibles a obturaciones aunque con estos goteros las líneas deban ser más cortas. Además, la conductividad hidráulica del suelo debe ser mayor que la descarga de los emisores para evitar sobrepresiones que pueden provocar la entrada de partículas de suelo en el emisor al cesar el riego, flujos preferenciales y surgencias en la superficie.

7. Caudalímetros y transductores de presión:

Tanto los caudalímetros como los transductores de presión han de ser suficientes para garantizar una correcta visualización del funcionamiento de la red. De esta forma, si aparece algún problema en la misma será rápidamente detectado y reparado.

8. Tuberías de vaciado y limpieza:

Estas tuberías se instalan conectando el final de las líneas portagoteros y se utilizan para el vaciado y limpieza de la instalación así como para proporcionar agua por el extremo de salida de las líneas portagoteros. La posibilidad de suministrar agua por los dos extremos de las líneas permite seguir regando zonas afectadas por obturaciones o aplastamiento de las líneas portagoteros. Estas tuberías deben diseñarse con una velocidad mínima de vaciado de 0.5 m/s para evitar la acumulación de sedimentos (Lamm et al., 2003).

9. Ventosas y válvulas anti-retorno:

Una correcta instalación de válvulas antiretorno evita la entrada de tierra en los goteros por

la succión que se produce al finalizar cada evento de riego. Asimismo, se recomienda instalar en los puntos más altos de la red ventosas antivacío capaces de evacuar el aire que alberguen las tuberías.

En las instalaciones de RGE bien diseñadas y mantenidas se han obtenido buenas eficiencias de aplicación del agua después de hasta 20 años de funcionamiento (Enciso-Medina et al., 2011). Las mayores eficiencias se alcanzaron en instalaciones que trabajaban entre el 65 y 100% de su presión nominal. Se han realizado numerosos estudios comparando las distintas opciones de instalación, y hay que resaltar que la combinación óptima para una zona puede no serlo para otra, ya que la uniformidad y eficiencia del riego viene determinada en gran medida por el suelo existente en la parcela.

El RGE debe diseñarse, como cualquier otro sistema de riego, para satisfacer las máximas necesidades de riego de los cultivos. El mantenimiento de las instalaciones debe evitar la obturación de goteros y permitir alcanzar uniformidades de riego óptimas de entre el 80 y 90%, salvo en zonas con pendientes en las que se aceptan valores de entre el 70 y 85% (Lamm y Camp, 2007).

Antes de la instalación del RGE es necesario analizar el suelo y el agua de riego. En el suelo se debe cuantificar la textura a distintas profundidades, la velocidad de infiltración y la capacidad de retención de agua que afectan a la distribución del agua. Aún así, en suelos con poca estructura, los perfiles de humedad pueden ser muy diferentes para suelos con textura muy similar. También conviene conocer la salinidad del suelo y la posible existencia de yeso. En el agua de riego se debe medir: Conductividad eléctrica, pH, cationes y aniones principales, Relación de Adsorción de Sodio, Nitrato, Boro, Fe, Mn, H₂S, sólidos totales en suspensión, población de bacterias y presencia de aceite (Rogers et al., 2003).

El manejo de la calidad del agua de riego es una consideración crítica en el RGE. Por ello, suele ser necesario inyectar productos químicos, como ácidos y cloro, que minimicen la obturación química y biológica de los emisores. Sin embargo, la adición de estos y otros productos químicos puede ser perjudicial para los cultivos sensibles a los mismos. Rogers et al. (2003) revisaron en profundidad los principales problemas de calidad de las aguas y las recomendaciones acerca de los tratamientos más efectivos para prevenir la obturación física, química y biológica de los emisores (Tabla 3).

La intrusión de raíces en los emisores es otro problema relevante. Además, las raíces de cultivos perennes pueden atenuar las líneas portagoteros y reducir o suprimir el flujo de agua. Ruskin et al. (1990) han discutido la incorporación de herbicidas de liberación controlada en los emisores (en este caso trifluralina) que evitaban la intrusión de raíces por un período de 10 años. Sin embargo, el beneficio de esta práctica depende del cultivo implantado. Actualmente existen goteros que incorporan herbicidas para evitar la intrusión de raíces, además de barreras físicas de diseños variados cuyo objeto es dificultar la penetración de las raíces al interior del gotero. Además de las medidas citadas anteriormente, el riego frecuente contribuye también a evitar este tipo de obturaciones.

El RGE aporta agua de forma no uniforme al suelo, aunque debe proporcionar a todas las plantas la misma oportunidad de acceder al agua de riego. La uniformidad inicial del sistema de riego puede verse afectada por obturaciones de los goteros, roturas producidas por animales o máquinas, o por aplastamiento de las líneas portagoteros. En cuanto a la frecuencia de riego, ésta resulta importante únicamente en cultivos con raíces muy profundas o en suelos muy profundos y arenosos. Sin embargo, puede haber beneficios asociados a riegos frecuentes y ligeros ya que disminuyen la percolación profunda.

Tabla 3. Tratamientos a aplicar al agua de riego para prevenir obturaciones en sistemas de microriego. Adaptado de Hanson et al. (1994) y Rogers et al. (2003).

Table 3. Water treatments to prevent clogging in microirrigation systems. Adapted from Hanson et al. (1994) and Rogers et al. (2003)

Problema	Opciones de tratamiento
Precipitación de carbonatos (precipitado blanco) Nivel en el agua de riego: HCO ₃ mayor de 2.0 meq/l pH mayor de 7.5	Acidificación del agua con ácido a elección (nitrítico, sulfúrico, clorhídrico, muriático, ureas ácidas...) siguiendo uno de estos dos patrones: <ul style="list-style-type: none"> • Inyección continua manteniendo el pH entre 5 y 7. • Inyección periódica manteniendo el pH por debajo de 4 diariamente entre 30 y 60 minutos.
Precipitación de hierro (precipitado rojizo) Nivel en el agua de riego: Concentraciones de hierro mayores de 0.1 ppm	<ul style="list-style-type: none"> – Oxigenación y precipitación del hierro oxidado (mejor tratamiento para altas concentraciones de 10 ppm o mayores). – Precipitación por cloración inyectando cloro para precipitar el hierro en una proporción de 1 ppm de cloro por 0.7 ppm de hierro. – Reducción del pH por debajo de 4 diariamente entre 30 y 60 minutos.
Precipitación de manganeso (precipitado negro) Nivel en el agua de riego: Concentraciones de manganeso mayores de 0.1 ppm	<ul style="list-style-type: none"> – Inyección de 1 ppm de cloro por cada 1.3 ppm de manganeso antes del filtrado.
Bacterias ferruginosas (limos rojizos) Nivel en el agua de riego: Concentraciones de hierro mayores de 0.1 ppm	<ul style="list-style-type: none"> – Inyección de cloro en una proporción de 1 ppm de cloro libre continuamente, o en una proporción de 10 a 20 ppm durante 30 a 60 minutos al día.
Bacterias sulfurosas (limos blancos algodonosos) Nivel en el agua de riego: Concentraciones de sulfuros mayores de 0.1 ppm	<ul style="list-style-type: none"> – Inyección continua de cloro en una proporción de 1 ppm por 4 a 8 ppm de sulfuro de hidrógeno o – Inyección intermitente de 1 ppm de cloro libre entre 30 y 60 minutos diariamente.
Bacterias limosas, algas	<ul style="list-style-type: none"> – Inyección de cloro en una proporción de 0.5 a 1 ppm continuamente o – Inyección de cloro a 20 ppm durante 20 minutos al finalizar cada riego.
Sulfuro de hierro (material negro arenoso) Nivel en el agua de riego: Concentraciones de hierro y sulfuros mayores de 0.1 ppm	<ul style="list-style-type: none"> – Disolución del hierro mediante inyección continua de ácido para bajar el pH a valores de entre 5 y 7.

RGE y salinidad

El riego por goteo es un sistema recomendado para el uso de aguas salinas debido a su capacidad para aplicar riegos frecuentes a dosis bajas que permiten mantener un adecuado volumen de suelo con contenidos de agua relativamente elevados en la zona radicular de los cultivos. Esta humedad del suelo alta y constante reduce las fluctuaciones de salinidad de la solución del suelo y favorece el lavado continuo de sales.

La fracción de lavado (FL) en sistemas de riego por aspersión y por superficie disminuye con la profundidad, exponiendo gran parte de las raíces a salinidades relativamente altas. Por el contrario, en riego por goteo las mayores FL se alcanzan cerca de los emisores, donde la salinidad de la solución del suelo es solo ligeramente más elevada que la del agua de riego (Shalhevet, 1994). El método clásico de cálculo de la FL basado en un balance de agua ($FL = (R - ET_c)/R$ en ausencia de lluvias) es inadecuado en riego por goteo (Hanson et al., 2008; Hanson, 2012), ya que proporciona una FL promedio para el total de la parcela regada que no es aplicable a este sistema donde la FL disminuye radialmente con la distancia al emisor. Por ello, estos autores definieron la fracción de lavado localizada (FLL) como la FL actual representativa del dominio de raíces (es decir, de la tasa de extracción del agua del suelo por los cultivos) en el entorno de los emisores. Así, el método del balance de agua resulta en valores promedio de FL cero o negativos cuando el riego aplicado es igual o menor a la ET del cultivo (ET_c), mientras que el valor de la FLL próximo a los emisores puede ser positivo para riegos aplicados inferiores a la ET_c . Por lo tanto, para la misma cantidad de agua aplicada, el riego por goteo resulta en valores inferiores de salinidad en las zonas próximas a los emisores (donde mayor es la densidad de raíces) que el riego por aspersión o

por superficie (donde una parte importante de raíces puede localizarse a profundidades con bajas FL y elevadas salinidades). De ahí que el riego por goteo esté recomendado sobre otros sistemas de riego cuando se utilizan aguas de riego salinas.

A pesar de los beneficios del riego por goteo para el control de la salinidad, deben tenerse en cuenta cinco problemas potencialmente relevantes relacionados con la salinidad de la solución del suelo (Hoffman y Shannon, 2007; Hanson, 2012): (1) si el manejo del sistema tiene como objetivo minimizar el uso del agua, pueden acumularse las sales de forma muy importante en los bordes del bulbo húmedo y en la superficie del suelo, particularmente en RGE, (2) debido a la acumulación de sales en la periferia del bulbo mojado, el emplazamiento de los emisores en relación a las plantas es crítico en cultivos sensibles a la salinidad, ya que si las líneas de goteo se desplazan de las líneas del cultivo las raíces pueden exponerse a zonas de menor humedad y mayor salinidad, (3) cualquier interrupción en la aportación de agua (como en ciertos períodos del riego deficitario regulado) o un aumento de las necesidades de riego más allá de los niveles previstos, puede conducir a pérdidas de rendimiento debido al exceso de salinidad, (4) lluvias relativamente elevadas pueden desplazar las sales acumuladas en los bordes del bulbo húmedo y en la superficie del suelo hacia la zona radicular, (5) el reposicionamiento de las líneas de cultivo entre campañas puede ocasionar problemas de uniformidad en la germinación e implantación del cultivo si la siembra se efectúa en las zonas donde se acumularon las sales en la campaña anterior.

Las sales acumuladas en superficie en riego por goteo superficial pueden desplazarse por la lluvia hacia la zona de raíces de los cultivos. Oron et al. (1999) indicaron que este problema puede minimizarse utilizando el RGE porque el frente salino se desplaza a profun-

didades mayores de suelo, fuera de la zona principal de raíces. Sin embargo, numerosos resultados de ensayos de campo y modelos de simulación (Hydrus en particular) demuestran que el ascenso continuo de agua en el RGE produce una acumulación adversa de sales por encima de las líneas portagoteros conforme el agua es evapotranspirada. Dado que en el RGE el único flujo entre las líneas portagoteros y la superficie del suelo es ascendente y no existe un flujo descendente de lavado de sales, esta acumulación de sales es, en ausencia de lluvias, irreversiblemente progresiva a lo largo de la campaña de crecimiento (evapotranspiración) del cultivo (Hanson y Bendixen, 1995; Dasberg y Or, 1999).

La tasa de acumulación de sales depende de varios factores incluyendo la calidad (salinidad) del agua (Ayars et al., 1993) y la evapotranspiración (Burt et al., 2003). Por ello, la acumulación de sales en RGE es particularmente preocupante en zonas áridas y semiáridas donde las elevadas evapotranspiraciones y las bajas precipitaciones asociadas a aguas de riego salinas, pueden resultar en concentraciones de sales extremadamente altas en o cerca de la superficie del suelo. Estos valores elevados de salinidad pueden ser especialmente negativos en parcelas replantadas en campañas sucesivas, en cuyo caso debe tenerse especial cuidado en el emplazamiento de las plantas para evitar las zonas de elevada salinidad. En términos generales, los problemas de salinidad en RGE no son relevantes en climas con precipitaciones superiores a 450 mm (Thompson et al., 2010), así como si se utilizan aguas de riego de excelente calidad ($CE < 0.5$ dS/m).

El lavado de sales sobre las líneas de goteo enterradas es a menudo necesario. Dado que el RGE no proporciona la forma de lavar estas sales, debe utilizarse otro sistema de riego de apoyo salvo en aquellos casos en que la precipitación sea suficiente para este lavado. Así, en zonas con precipitaciones insuficien-

tes se suele instalar un sistema de aspersión con cobertura móvil para conseguir tanto el lavado de sales como la germinación de semillas. La necesidad de utilizar un segundo sistema de riego puede comprometer la sostenibilidad económica del RGE.

El diseño del RGE puede afectar a la severidad de los problemas de salinidad. Las líneas portagoteros superficiales conducen a mayores acumulaciones de sal en superficie debido a la mayor humedad y evaporación del suelo superficial (Oron et al., 1999; Roberts et al., 2008), pero necesitan de menores cantidades de lluvia para reducir la salinidad de esta sección de suelo de menor espesor que la que se produce en líneas portagoteros más profundas (Hanson y Bendixen, 1995). Las líneas portagoteros con un menor espaciado entre ellas y con goteros más próximos entre sí favorecen la uniformidad del riego y un alto contenido de agua en el suelo que permite un mejor control de la salinidad en la zona de raíces (Ayars et al., 1999). Asimismo, el mejor control de la salinidad se obtiene cuando las líneas portagoteros y las líneas de plantación coinciden, ya que la mayor densidad de raíces se alcanza cerca de las líneas portagoteros que es la zona del suelo con una mayor FL y una menor salinidad (Hanson, 2012).

Conclusiones

El riego por goteo enterrado (RGE) es un sistema que, bien diseñado, manejado y mantenido, ha demostrado su utilidad, rentabilidad y sostenibilidad en numerosos casos y, en particular, en cultivos perennes regados con aguas de buena calidad donde las líneas portagoteros pueden instalarse en profundidad eliminando así los problemas derivados de saturar la superficie del suelo (evaporación, crecimiento de malas hierbas, problemas sanitarios, etc).

Sin embargo, en otros casos como el RGE en cultivos anuales regados con aguas de baja calidad en zonas áridas y semiáridas, puede ocasionar problemas que es necesario diagnosticar antes de su instalación. En particular, hay tres aspectos que han de ser tenidos especialmente en cuenta:

1. Diseño y manejo: el diseño inicial correcto del RGE es fundamental, ya que los errores cometidos no pueden corregirse fácilmente dado que la mayor parte de la instalación se encuentra enterrada. Este diseño debe incorporar equipos (sistemas de elevado filtrado, tuberías de lavado, manómetros, ventosas, emisores autocompensantes y antisucción con incorporación de herbicidas de liberación controlada que limiten la intrusión de raíces, etc.) y tratamientos preventivos del agua de riego que minimicen las obturaciones físicas, químicas y biológicas de los emisores. Estos equipos y tratamientos, innecesarios en otros sistemas de riego, pueden comprometer la viabilidad económica del RGE.
2. Germinación y establecimiento del cultivo: el humedecimiento apropiado de la superficie del suelo para alcanzar la germinación y establecimiento uniforme del cultivo puede exigir elevadas dotaciones de agua, especialmente en suelos de textura gruesa. La necesaria instalación superficial de las líneas portagoteros limita el laboreo del suelo y pueden verse dañadas o aplastadas por el tráfico sobre la parcela. Asimismo, es deseable que las distancias entre las líneas portagoteros coincidan con las distancias entre las líneas de cultivos en rotación para favorecer la uniformidad de la plantación.
3. Salinidad: La acumulación de sales entre la superficie del suelo y la línea portagoteros debido al efecto combinado de la evaporación de las sales disueltas por evapotranspiración y la ausencia de lavado por encima de la línea portagoteros es un aspecto de especial relevancia en zonas

donde la precipitación es insuficiente para el lavado de sales. Tanto los problemas de germinación como los de salinidad pueden exigir el uso temporal de otros sistemas de riego con un coste añadido que puede comprometer la sostenibilidad económica del RGE.

El resultado final derivado de estas y otras consideraciones detalladas en esta revisión es que el diseño, manejo y mantenimiento del RGE, junto con la calidad del agua de riego y el tipo de suelo, son los aspectos fundamentales que determinan su sostenibilidad. En consecuencia, la evaluación en cada caso particular de las ventajas y limitaciones del RGE es estrictamente necesaria para proporcionar recomendaciones sólidas a los agricultores acerca de la viabilidad y rentabilidad económica de este sistema de riego.

Bibliografía

- Ayars JE, Schoneman RA, Soppe RW, Mead RM, 1998. Irrigating cotton in the presence of shallow ground water. Drainage in the 21st century: Food production and the environment, Proc. Seventh Int. Drainage Symposium, ASA E, Orlando, FL, March, pp. 82-89.
- Ayars JE, Hutmacher RB, Schoneman RA, Vail SS, Pflaum T, 1993. Long term use of saline water for irrigation. *Irrig. Sci.*, 14: 27-34.
- Ayars JE, Phene CJ, Hutmacher RB, Davis KR, Schoneman RA, Vail SS, Mead RM, 1999. Subsurface drip irrigation of row crops: A review of 15 years of research at the Water Management Research Laboratory. *Agric. Water Manage.*, 42: 1-27.
- Ayars JE, Schoneman RA, Dale F, Meson B, Shouse P, 2001. Managing subsurface drip irrigation in the presence of shallow ground water. *Agric. Water Manage.*, 47: 242-264.
- Burt CM, Styles SW, 1994. Drip and Microirrigation for Trees, Vines, and Row Crops Irrigation Training and Research Center, California Polytechnic State University, San Luis Obispo, CA. 261 pgs.

- Burt CM, Al-Amoudi O, Paolini A, 2003. Salinity patterns on row crops under subsurface drip irrigation on the Westside of the San Joaquin Valley of California. ITRC Report No. R 03-004.
- Camp CR, 1998. Subsurface drip irrigation: A review. *Trans. ASAE*, 41(5): 1353-1367.
- Charlesworth PB, Muirhead WA, 2003. Crop establishment using subsurface drip irrigation: A comparison of point and area sources. *Irrig. Sci.*, 22: 171-176.
- Dasberg S, Or D, 1999. *Applied Agriculture: Drip Irrigation*. Springer-Verlag, New York, NY.
- Enciso-Medina J, Multer WL, Lamm FR, 2011. Management, maintenance, and water quality effects on the long-term performance of subsurface drip irrigation systems. *Appl. Engr. Agric.* 27(6): 969-978.
- Hanson B, Schwankl L, Grattan SR and Prichard T, 1994. *Drip Irrigation for Row Crops*. Water Management Series #93-05. University of California, Davis. Davis, CA.
- Hanson BR, Bendixen WE, 1995. Drip irrigation controls soil salinity under row crops. *Calif. Agric.*, 49(4): 19-23.
- Hanson BR, May DM, 2004. Effect of subsurface drip irrigation on processing tomato yield, water table depth, soil salinity, and profitability. *Agric. Water Manage.*, 68: 1-17.
- Hanson B, Hopmans JW, Šim nek J, 2008. Leaching with Subsurface Drip Irrigation under Saline, Shallow Groundwater Conditions. *Soil Science Society of America, Vadose Zone Journal*, 7(2): 810-818.
- Hanson BR, 2012. Drip Irrigation and Salinity (Chapter 17). In: Wallender, W.W., Tanji, K.K. (Eds.). *Agricultural Salinity Assessment and Management.*, Second Edition, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71. American Society of Civil Engineers, Reston, Va, pp. 539-559.
- Hoffman GJ, Shannon MC, 2007. Salinity (Chapter 4). In: F.R. Lamm, J.E. Ayars, F.S. Nakayama (Editors), *Microirrigation for Crop Production*. Elsevier B.V. Pp. 131-160.
- Hutmacher RB, Mead RM, Shouse P, 1996. Subsurface drip: Improving alfalfa irrigation in the west. *Irrig. J.* 45: 48-52.
- Lamm FR, Manges HL, Stone LR, Khan AH, Rogers DH, 1995. Water requirement of subsurface drip-irrigated corn in northwest Kansas. *Trans. ASAE*, 38(2): 441-448.
- Lamm FR, Rogers DH, Alam M, Clark GA, 2003. Design Considerations for Subsurface Drip Irrigation (SSDI) Systems. *Irrigation Management Series- Reports of Kansas State University*. 8 pp.
- Lamm FR, Camp CR, 2007. Subsurface Drip Irrigation (Chapter 13). In: F.R. Lamm, J.E. Ayars, F.S. Nakayama (Editors), *Microirrigation for Crop Production*. Elsevier B.V. Pp. 473-551.
- Oron G, DeMalach Y, Gillerman L, David I, Rao VP, 1999. Improved saline-water use under subsurface drip irrigation. *Agric. Water Manage.*, 39: 19-33.
- Phene CJ, Phene RC, 1987. Drip irrigation systems and management. *ASPAC Food and Fertilizer Tech. Ctr., Taiwan, ROC; Ext. Bull. No. 244*. 24 pp.
- Phene CJ, 1990. Drip irrigation saves water (pp. 645-650). In: *Proc. Conservation 90, The National Conference and Exposition: Offering Water Supply Solutions for the 1990's*. Phoenix, AZ. 12-16 Aug. 1990. *Am. Water Resour. Assoc.*, Middleburg, VA.
- Roberts TL, White SA, Warrick AW, Thompson TL, 2008. Tape depth and germination method influence patterns of salt accumulation with subsurface drip irrigation. *Agric. Water Manage.*, 95: 669-677.
- Rodríguez Ly Gil M, 2012. A Review of Subsurface Drip Irrigation and Its Management. In: *Water Quality, Soil and Managing Irrigation of Crops*. Teang Shui Lee (Editor). Pp 175-194.
- Rogers DH, Lamm FR, Alam M, 2003. *SDI Water Quality Assessment Guidelines*. K-State Research and Extension.
- Ruskin R, Van Voris P, Cataldo DA, 1990. Root intrusion protection of buried drip irrigation devices with slow-release herbicides. In: *Proc. 3rd Nat. Irrigation Symp.*, 211-216. St. Joseph, Mich.: ASAE.

- Shalhevet J, 1994. Using water of marginal quality for crop production: Major issues. *Agric. Water Manage.*, 25: 233-269.
- Siefert WJ Jr, Hiler EA, Howell TA, 1975. Trickle irrigation with water of different salinity levels. *Trans. ASAE*, 18(1): 89-94.
- Thompson TL, Doerge TA, Godin RE, 2002. Sub-surface drip irrigation and fertigation of broccoli: I. Yield, quality, and nitrogen uptake. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66: 186-192.
- Thompson TL, Roberts T, Lazarovitch N, 2010. Managing soil surface salinity with subsurface drip irrigation. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World 1-6 August 2010, Brisbane, Australia. Pp. 40-42 (Published on DVD).
- Tingwu L, Juan X, Guangyong L, Jianhua M, Jianping W, Zhizhong L, Jianguo Z, 2003. Effect of drip irrigation with saline water on water use efficiency and quality of watermelons. *Water Resour. Manage.*, 17: 395-408.
- (Aceptado para publicación el 7 de mayo de 2013)