

GRADOS DE OBTURACIÓN ALCANZADOS POR EMISORES A LO LARGO DE UN TIEMPO TRABAJANDO CON AGUAS RESIDUALES DEPURADAS.

Rosa M^a Chica ¹; José Roldán ²; Miguel Alcaide ²

Resumen

Tanto el respeto al medio ambiente como la necesidad de buscar nuevos recursos hídricos está promoviendo la reutilización de aguas residuales utilizando sistemas de riego por goteo, garantizando con un buen manejo y aplicación un uso eficiente del recurso agua. Para conocer el principal problema que se plantea en estos sistemas, como es la obstrucción de los emisores, se ha llevado a cabo este trabajo. Se han estudiado los emisores que son más aptos para resistir al atascamiento, para ello se ha seguido la evolución a lo largo del tiempo de varios emisores comerciales trabajando con distintas calidades de aguas depuradas, calculando el grado de obturación (G.O) que alcanzan cada uno de ellos. Entre las conclusiones destacar que la calidad del agua residual influye muy significativamente en el grado de obturación, recomendándose para disminuir éste, al menos un tratamiento primario al agua residual más una filtración.

Palabras clave: Riego localizado, gotero, obturación, agua residual.

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En los últimos años, el uso correcto del agua se ha convertido en un objetivo primordial. Las zonas donde hay escasez de agua, como sucede en el sudeste de España, se caracterizan por tener un balance hídrico bastante deficitario y una base económica sustentada en el cultivo intensivo de hortalizas bajo cubierta de plástico, con una demanda creciente de agua, tanto para consumo humano como para usos agrícolas. Esta situación hace que se acentúen problemas tales como agotamiento de los acuíferos, su salinización y empobrecimiento. También se plantea este problema en otras zonas donde la situación no es tan deficitaria, pero que en determinadas circunstancias pueden conllevar escasez en los recursos hídricos disponibles, lo que se ha puesto claramente de manifiesto durante los últimos años. Si se considera que el agua es un recurso limitado, y su demanda está creciendo por sectores no agrarios, urbanos, industriales y de servicios

y cuyo uso sostenible y eficiente es exigido por la sociedad, no es extraño que su consumo se priorice en un orden a establecer, donde la agricultura no figura en un lugar preferente. Con estas perspectivas resulta imprescindible tanto la aplicación de técnicas de optimización, que comienzan por un diseño correcto del riego y que deben conducir al uso de la dosis correcta, distribución uniforme y alta eficiencia de aplicación, como la búsqueda de nuevas fuentes que ayuden a paliar las limitaciones del factor agua para el desarrollo agrario (Iqbal, 1987; Godet y Brissaud, 1991; Oron y Demalach, 1987). En este punto, puede resultar atractivo considerar las aguas residuales tratadas como complemento hídrico en algunos casos y, en otros, un factor determinante al no existir otro tipo de agua, sobre todo cuando nos encontramos con climas áridos y semiáridos. Además, el crecimiento de las disponibilidades de aguas residuales tanto urbanas como de instalaciones agropecuarias e industriales, hacen que convenientemente tratadas puedan llegar a te-

(1) Universidad de Almería. Depart. de I. Rural. Ctra. Sacramento, s/n. 04120- Cañada de San Urbano-Almería. Telf.: 950 215 063. rmchica@ual.es

(2) Universidad de Córdoba. Depart. de Agronomía. Avda. Menéndez Pidal, s/n. Apdo. 3.048-14080- Córdoba.

Artículo recibido el 12 de junio de 2000, recibido en forma revisada el 5 de diciembre de 2000 y aceptado para su publicación el 6 de marzo de 2001.

Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

ner un uso agrícola, de espacios públicos y jardinería, entre otros. Ante estas perspectivas, y puesto que es la agricultura el mayor consumidor del recurso, se plantea la necesidad de estudiar, de manera conjunta, la depuración y el aprovechamiento de las aguas residuales con fines de riego, a la vez que establecer cuál de los sistemas de riego es el más apropiado, tanto desde el punto de vista hidráulico como agronómico y sanitario. La reutilización de aguas residuales para regadío conlleva la realización de un manejo y control que elimine o minimice los riesgos profesionales que ésta implica, y con un reglamento de seguridad e higiene específico.

Así, el agua residual tratada junto con el empleo de métodos de aplicación localizada del agua, puede suponer además de un recurso adicional para la agricultura, una salida de carácter medioambiental al darle ubicación y utilidad a un residuo líquido contaminante.

Desde el punto de vista de la salud pública, esta práctica es considerada como el método de riego más conveniente, evita problemas de enfermedades a los usuarios, puesto que el agua llevada a presión a cada planta por una red de canalizaciones se infiltra en el suelo tan pronto como sale del distribuidor, sin escurrir ni mantener encharcada la superficie. Tampoco se pone en contacto con la parte aérea de la planta por lo que no es arrastrada por el aire (Asano y Pettygrove, 1987).

Sin embargo, como inconvenientes en estos sistemas hay que señalar, por un lado, que al ser los emisores los elementos más importantes en riego localizado y también los más delicados, la calidad de estas aguas pueden incrementar un problema esencial en los goteros como es su atascamiento (Abbott, 1988), reduciendo la uniformidad de distribución (Bratls y col., 1981; Gilbert y col., 1981), y por otro lado, al ser de aplicación muy reciente la utilización de este tipo de aguas, faltan tanto experiencias a escala real y criterios racionales para el diseño y operación del sistema (Massoud y col., 1994), como información de las características de estructura y forma que deben tener los goteros en relación con los pretratamientos que hay que hacer para las distintas calidades de aguas (Asano y Pettygrove, 1987), con objeto de poder evitar o disminuir su obturación.

En este contexto nos va a interesar estudiar los emisores que son más aptos para resistir a la obstrucción y para ello se ha seguido la evolución a lo largo del tiempo de varios emisores comerciales

trabajando con distintas calidades de aguas depuradas, según el pretratamiento realizado. Se pretende conocer cómo se comportan varios tipos de emisores cuando se emplean aguas residuales depuradas con tratamiento primario frente al agua limpia, trabajando durante un tiempo acumulado de 100 horas, así como estudiar el grado de obturación de un mismo gotero con dos tipos de aguas residuales, con distinto estado de depuración y trabajando durante un tiempo acumulado de 620h, tiempo equiparable a una campaña de riego. También se quiere comparar el comportamiento de los tipos de emisores ensayados entre sí, con objeto de aconsejar sobre el tipo de emisor más adecuado, relacionar la calidad del agua con el coeficiente de variación de cada emisor (CV). Y por último ver la influencia del aumento de la presión en los goteros cómo método preventivo al atascamiento, y dar unas recomendaciones sobre pretratamientos y calidad aconsejable del agua residual depurada a utilizar, para disminuir en lo posible el grado de obturación de los emisores.

ANTECEDENTES

Entre los escasos trabajos de investigación relacionados con el problema de las obturaciones en los emisores utilizados en los sistemas de riego por goteo, y la calidad de las aguas residuales a utilizar, tenemos las experiencias llevadas a cabo por Lesavre y col. (1988), quienes efectuaron una selección de emisores resistentes a la obstrucción, para utilizarlos en sistemas de riego por goteo subterráneo utilizando aguas residuales. Massoud y col. (1994), realizaron una clasificación donde establecían la sensibilidad del emisor a la obturación según la dimensión mínima de paso. Otros autores como Gamble (1986); y Nakayama y Bucks (1991) trabajaron con la posibilidad de utilizar emisores autolimpiantes, con objeto de disminuir los problemas de obturación. Nakayama y Bucks (1991) desarrollaron una clasificación en relación con la calidad del agua y el potencial de obturación de goteros (tabla 1)

Gilbert y col. (1982) estudiaron la obturación en ocho emisores, incluyendo tres tipos autolimpiantes, usando aguas del Río Colorado con varios grados de tratamiento. En los cuatro años de estudio encontraron que los tratamientos del agua eran esenciales para un funcionamiento adecuado de todos los emisores.

Oron y col. (1982) realizaron otro estudio

GRADOS DE OBTURACIÓN ALCANZADOS POR EMISORES A LO LARGO DE UN TIEMPO TRABAJANDO CON AGUAS RESIDUALES DEPURADAS

Factores de obturación	Peligro obturación		
	Bajo	Medio	Alto
Físico			
Sólidos en suspensión (mg/l)	<50	50-100	>100
Químico			
pH	<7.5	7.0-8.0	>8.0
Sólidos Disueltos (mg/l)	<500	500-2000	>2.000
Manganeso(1) (mg/l)	<0.1	0.1-1.5	>1.5
Hierro total (2) (mg/l)	<0.2	0.2-1.5	>1.5
H ₂ S (mg/l)	<0.2	0.2-2.0	>2.0
Población biológica (nºbacterias/ml)	<10.000	10.000-50.000	>50.000

(1) A pesar de que estas concentraciones pueden ser insuficientes para causar problemas en un sistema de riego localizado, los problemas de fitotoxicidad pueden detectarse a concentraciones inferiores a éstas.

(2) Concentraciones de hierro superiores a 5,0 mg/l pueden causar desequilibrios nutritivos en determinados cultivos

Tabla 1. Calidad del agua de riego con relación a los posibles problemas de obstrucción en sistemas de riego localizado. Nakayama y Bucks (1991)

usando emisores tipo laberinto con aguas residuales depuradas en lagunas de oxidación sometiendo el agua a un tratamiento de filtración, junto con la limpieza del ramal.

Por otra parte, los métodos de tratamiento del agua han sido extensamente estudiados, y son válidas algunas recomendaciones prácticas para aguas de calidades específicas (Bucks y col. 1979; Gilbert y Ford, 1986; Nakayama, 1986).

Un estudio realizado en Hawaii incluía dos proyectos, el primero estudiaba métodos de tratamiento en aguas residuales depuradas para usar en riego por goteo (Lau y col. 1981), el segundo evaluó varios diseños hidráulicos en sistemas de riego por goteo (Mc Donald y col. 1984). Dentro del primer ensayo los resultados a destacar era la inexistencia de ningún producto químico que controlase totalmente la obturación. Los sólidos en suspensión daban lugar a que tanto los filtros como los emisores se obturasen (Lau y col. 1984). Dentro del segundo estudio se llegó a obtener un diámetro crítico para emisores tipo microjet.

Adin y Sacks (1991) examinaron la obturación de varios tipos de emisores con aguas depuradas sometidas a filtración y con aguas no filtradas.

Massoud y col. (1994) establecieron que para aguas depuradas con tratamiento secundario, la filtración solamente no evita la obturación de los emisores. Sin embargo, una adecuada filtración, con un filtro de granulometría media, reduce las necesidades de cloración y frecuencia de lavado de los laterales.

El tratamiento del agua mediante sistemas de filtración es una forma de disminuir la obturación de los emisores. Ravina y col. (1995); Juanico y col. (1995); Massoud y col. (1994); Puig y col. (1999), son algunos de los autores que han evaluado la obturación de emisores que trabajan con aguas residuales con distintas clases de filtros.

Chica, 1999, obtuvo que en principio, la calidad del agua influye muy poco para caracterizar tanto los parámetros hidráulicos de cada gotero, curva caudal-presión, como para clasificarlos.

MATERIAL Y MÉTODOS

Infraestructura y equipos para la experimentación

Se ha dispuesto de un banco de ensayos que se corresponde con el esquema de la figura 1.

Se han diseñado unos ramales portagoteros en los que se han colocado seis emisores distintos en cada ramal. La tubería portagotero es de 16 mm de diámetro y la distancia entre emisores es de 0.20 m. El agua entra en el ramal por los dos extremos, y como su longitud es muy pequeña, la presión a lo largo del ramal se puede considerar constante. En cada ensayo se disponía de cuatro ramales lo que significaba un total de cuatro repeticiones de cada gotero distribuidos al azar.

La mesa dispone de un equipo de filtrado, constituido por un filtro de anillas de 120 mesh (F1) y un filtro de arena (F2) con un tamaño de partículas de 1,2 mm de diámetro, situados en las posi-

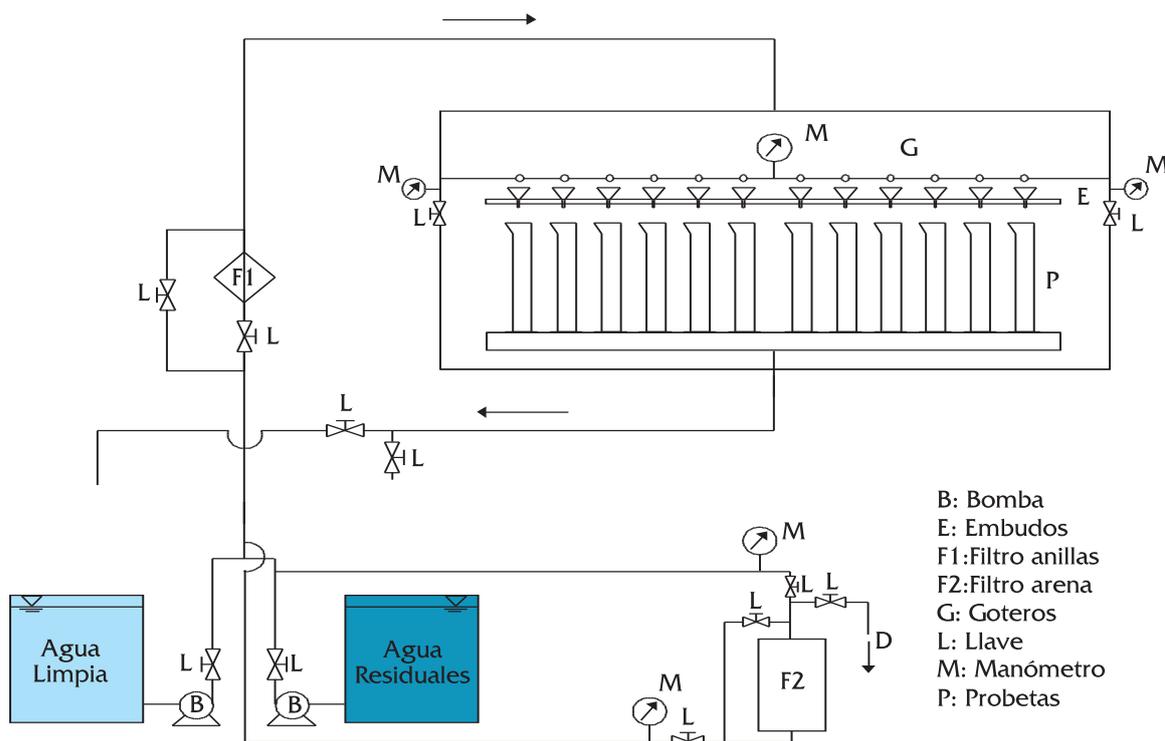


Figura 1. Banco de ensayo de goteros

ciones que se indican en la figura 1. El paso del agua residual depurada con tratamiento primario por los filtros proporciona un agua residual depurada con mucha menos cantidad de sólidos en suspensión (S.S), lo que demuestra el efecto específico de los mismos.

Caracterización de los emisores

Se seleccionaron seis modelos comerciales para evaluar el efecto del tiempo y la calidad del agua residual depurada en la obturación de los emisores, y se nombraron con las letras A, B, C, D, E, F. Las características generales, junto con los parámetros (k,x) de la ecuación (1) de gasto del emisor:

$$Q = k p^x \quad (1)$$

siendo **Q** el gasto del gotero (lh⁻¹), **q_n** caudal nominal (lh⁻¹) y **p** la presión de funcionamiento (kPa) y

el coeficiente de variación del fabricante (**CV_k**) se presentan en la tabla 2 (Chica, 1999).

Caracterización de las aguas residuales utilizadas

Los tipos de calidades de agua utilizadas en este ensayo han sido:

1º. agua residual depurada con tratamiento primario. Este agua nos ha sido proporcionado por la Estación Depuradora de Aguas Residuales (E.D.A.R.) “La Golondrina” de Córdoba.

2º. el mismo agua anterior, pero haciéndola pasar por los filtros disponibles en el banco de ensayos.

3º. agua limpia, de la red.

Emisor	Par. Ecuac. Q-p		q _n (l/h)	CV _k (%)	Tipo
	k	x			
A	2,79	0,08	4	3,41	Autocompensante pinchado
B	0,38	0,49	4	3,49	Integrado de laberinto con régimen turbulento
C	0,41	0,48	3,8	1,26	Pinchado desmontable de laberinto con régimen turbulento
D	4,61	-0,02	4	1,90	Autocompensante antidrenante pinchado
E	0,44	0,48	4	3,08	Interlínea desmontable de laberinto con régimen turbulento
F	0,54	0,44	4	3,00	Interlínea no desmontable de laberinto régimen turbulento

Tabla 2. Características generales de los emisores evaluados en el ensayo.

GRADOS DE OBTURACIÓN ALCANZADOS POR EMISORES A LO LARGO DE UN TIEMPO TRABAJANDO CON AGUAS RESIDUALES DEPURADAS

	Tratamiento. 1 ^o	Tratamiento 1 ^o +Filtros(A1)	Tratamiento 1 ^o +Filtros(A2)	Limpia
SS (mg/l)	108,77	44,6	6	Sin especificar ¹
D.B.O. (mg/l)	264,08	235	-	Sin especificar
D.Q.O. (mg/l)	567,69	500	-	Sin especificar
Ph	7,64	7,88	-	7,65
Conductividad (microS ⁺ cm ⁻¹)	964,62	1103	-	330
Hierro (microg/l)	2000,00	-	-	-
Fósforo total (mg/l)	9,00	-	-	-
Nitratos (mg/l)	<5	-	-	-

1. Residuo seco < 1500 mg/l-1

- No se analizó

Tabla 3. Características de las aguas utilizadas en los ensayos.

Los datos de las características físico-químicas del agua residual con tratamiento primario eran proporcionados por la estación depuradora (E.D.A.R.) cada vez que se recogía agua. En la tabla 3 se muestra la composición media de dichas aguas. También se llegó a analizar el segundo tipo de agua por el mismo laboratorio, apreciándose que los filtros fundamentalmente hacían disminuir la cantidad de sólidos en suspensión (SS).

Un inconveniente que presentaban estos ensayos, es que el banco de pruebas estaba situado lejos de la planta depuradora; así, el agua residual era transportada en pequeños depósitos de 25 litros hasta donde estaba situado el banco en el laboratorio. Aunque el agua era renovada muy a menudo (cada 4h de funcionamiento se le añadía agua al depósito), el mismo agua estaba recirculando a través de los depósitos, tuberías, bombas, ramales y emisores durante ese tiempo. No hubo variaciones significativas en el ensayo utilizando agua residual depurada con tratamiento primario porque las características del agua apenas variaban, pero sí había, cuando se utilizaba el agua residual con tratamiento primario más sistemas de filtrado, puesto que al recircular el agua, ésta cada vez se iba depurando más.

Para estudiar este punto, se analizó el agua residual con tratamiento primario que salía de los emisores (A1) en los primeros instantes después de añadir el agua a los depósitos y haber pasado por los filtros; después se recogió una muestra a las 4 horas de recircular el agua (A2), y este proceso se repitió varias veces. Los resultados obtenidos fueron los que aparecen en la tabla 3. Se pudo comprobar, en primer lugar, que las diferencias entre las características del agua residual depurada con tratamiento primario y las de la misma pasando por el sistema de filtrado en la mesa por primera vez, sólo se debían prácticamente en la cantidad de sólidos en suspensión, que disminuía desde 108,77 a 44,6 mg/l⁻¹. Por otra parte, cuando el agua residual depu-

rada con tratamiento primario recirculaba un tiempo determinado, la cantidad de sólidos en suspensión bajaba hasta 6 mg/l⁻¹, cantidad que se acerca a la obtenida si el agua hubiese sufrido un tratamiento secundario.

Según la clasificación de Nakayama y Bucks (tabla 1), el peligro de obturación del agua residual con tratamiento primario sería alto por la cantidad de sólidos en suspensión; para el agua residual con tratamiento primario y sistemas de filtrado sería medio porque su pH está comprendido entre 7.0-8.0, aunque por su cantidad de sólidos en suspensión sería bajo.

Desarrollo experimental

Sensibilidad a la obturación de los emisores a las 100 horas de funcionamiento cuando se utiliza agua limpia y agua residual depurada con tratamiento primario.

El ensayo se dividió en dos partes; en la primera parte del ensayo, se utilizaron dos tipos de agua: agua limpia y agua residual depurada con tratamiento primario. Se usaron cuatro ramales para estudiar su funcionamiento con cada tipo de agua, y se pusieron a trabajar cuatro horas diarias, cinco días a la semana con cada tipo. Al finalizar las cuatro horas de funcionamiento se anotaban los caudales emitidos por cada gotero a las presiones de 60, 100, 140 y 180 kPa. y la temperatura, medida por un termómetro de mercurio con precisión $\pm 1^\circ\text{C}$; y así hasta acumular un total de 100 horas de trabajo, tiempo equiparable a un mes de riego en un cultivo que se riega de la misma forma.

Con el funcionamiento de los goteros a presión nominal de trabajo (100 kPa), se calculó el caudal medio para cada uno de ellos al inicio y al final del ensayo. Se determinó para cada tipo de agua y emisor:

1°.- La disminución de caudal a las 100 horas de funcionamiento respecto al caudal nominal (D_q) en tanto por ciento:

$$D_q = \frac{\bar{q}_f - q_n}{q_n} \times 100 \quad (2)$$

siendo, q_n ($l\cdot h^{-1}$) el caudal nominal y ($l\cdot h^{-1}$) el caudal medio de cada tipo de emisor al finalizar el ensayo.

2°.- El grado de obturación (G.O) en tanto por ciento de cada emisor, calculado como:

$$G.O. = \left(1 - \frac{\bar{q}_f}{\bar{q}_i} \right) \times 100 \quad (3)$$

siendo, \bar{q}_i ($l\cdot h^{-1}$) el caudal medio de cada tipo de emisor al iniciar cada ensayo.

Estos datos se analizaron estadísticamente mediante un programa de ordenador (Statgraphics). Se les aplicó el método de análisis de varianza (ANOVA), y las medias se separaron utilizando el test de mínima diferencia significativa (LSD), con un nivel de significación del 95% (González y col., 1997).

Sensibilidad a la obturación de los emisores a las 620 horas de funcionamiento cuando se utiliza agua residual depurada con tratamiento primario y agua residual depurada con tratamiento primario más sistema de filtrado.

En la segunda parte del ensayo se utilizó agua residual con tratamiento primario y agua residual con tratamiento primario más sistema de filtrado. Para evitar montar y desmontar cada día los ramales correspondientes para cada tipo de agua se trabajó primero con cuatro ramales y un tipo de agua y luego con otros cuatro ramales y el otro tipo, durante un total de 620 horas. El procedimiento seguido fue poner a trabajar los emisores 4 horas cada día durante las 300 primeras horas, para luego aumentar el número de horas diarias hasta conseguir el total de horas acumuladas. Cada 4 horas se anotaba el caudal a la presión nominal de funcionamiento (100 kPa), y cada 100 horas se anotaba el caudal a las presiones de 60, 100, 140 y 180 kPa, con el objeto de poder determinar cómo variaba la curva caudal presión (Q-p) en cada gotero y con cada tipo de agua. De la misma manera que en la primera parte del ensayo se determinó tanto D_q como G.O. sólo que ahora a las 620 horas de funcionamiento, y a los resultados se les aplicó el mismo test estadístico.

La variación de los caudales de cada emisor a lo largo del tiempo se ajustó a curvas del tipo lineal, potencial, polinomial, exponencial, y logarítmica, al objeto de encontrar las ecuaciones que mejor los representen.

A partir de los datos obtenidos de caudales emitidos por los emisores de forma volumétrica a las presiones de: 60, 100, 140 y 180 kPa, y mediante un análisis estadístico de regresión se determina la fórmula de gasto de cada gotero con cada tipo de agua residual.

Se considera que la variación del caudal del emisor a lo largo del tiempo depende del proceso de manufactura, de la presión de operación, de la temperatura y del grado de obturación debido a la calidad del agua que está pasando por el emisor. Si trabajamos a presión constante ($p_n = 100$ kPa), los datos experimentales se pueden analizar mediante un diseño factorial de análisis de varianza con los tres factores a considerar: coeficiente de variación de fabricación; de temperatura y de obturación. Este tipo de análisis muestra la contribución de cada factor en relación con la varianza total observada en el caudal del emisor. Cada contribución está expresada como un coeficiente de variación. De esta manera, y de acuerdo con el análisis de varianza (Cooper. 1969), podemos determinar el coeficiente de variación debida a la obturación CV_o de cada emisor y tipo de agua en cada etapa del ensayo a partir de la expresión:

$$CV^2 = \frac{V}{\bar{q}^2} = CV_k^2 + CV_t^2 + CV_o^2 \quad (4)$$

siendo, V = varianza del caudal del emisor; CV = coeficiente de variación de cada emisor en cada tiempo y con cada tipo de agua; y CV_t = coeficiente de variación debida a la temperatura de cada ensayo con cada tipo de agua residual depurada. Los valores obtenidos del CV_o a lo largo del tiempo se analizaron, y mediante un análisis de regresión se ajustaron a la curva correspondiente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ensayos a las 100 horas de funcionamiento en los seis tipos de emisores

En la tabla 4 se muestra la variación de caudales de los emisores trabajando con agua limpia (A.L) y con agua residual depurada con tratamiento primario (A.R.D.T°1°) inicial y a las 100 horas

GRADOS DE OBTURACIÓN ALCANZADOS POR EMISORES A LO LARGO DE UN TIEMPO TRABAJANDO CON AGUAS RESIDUALES DEPURADAS

Emisores	q_n (lh ⁻¹)	Agua limpia				Agua residual depurada con tratamiento primario			
		$Q_{inicial}$ (lh ⁻¹)	Q_{100h} (lh ⁻¹)	D_q (%)	G.O. (%)	$Q_{inicial}$ (lh ⁻¹)	Q_{100h} (lh ⁻¹)	D_q (%)	G.O. (%)
Gotero A	4	4,31	4,01	0,25	6,96	3,03	2,4	-40	20,79
Gotero B	4	3,57	3,65	-8,75	-2,24	3,72	3,58	-10,5	3,76
Gotero C	3,8	3,60	3,63	-4,47	-0,83	3,78	3,71	-2,37	1,85
Gotero D	4	4,11	4,21	5,25	-2,43	4,03	4,18	4,5	-3,72
Gotero E	4	4,31	4,32	5,75	-0,23	4,37	4,23	5,75	3,20
Gotero F	4	3,90	3,93	-1,75	-0,77	4,12	4,06	1,5	1,46

Tabla 4. Variación, D_q y G.O. de los emisores a las 100 horas de funcionamiento a presión nominal (100 kPa)

de funcionamiento a presión nominal; además de D_q y el G.O.

El signo positivo que aparece en el término de desviación de caudales, significa que los goteros incrementan su caudal a medida que aumentan las horas de funcionamiento. Sin embargo, el signo negativo que aparece en el grado de obturación significa que no existe obturación, al ser el caudal final mayor que el inicial en cada etapa. Con el agua limpia ninguno de los goteros excepto el gotero A, presenta obturación. No ocurre lo mismo con el agua residual depurada con tratamiento primario, donde todos excepto el gotero D, presentan un determinado grado de obturación. Con el análisis estadístico de varianza realizado (ANOVA), con los dos tipos de aguas, se ha comprobado al separar las medias (LSD) que no hay diferencia significativa del grado de obturación con el tipo de agua. Por emisores, si se encuentra diferencia significativa entre el grado de obturación del gotero A y el resto de goteros.

El cambio de la presión nominal de trabajo (100 kPa) a las presiones de: 60, 140, y 180 kPa cada 4 horas, con objeto de realizar las curvas caudal-presión, pudo influir positivamente en la disminución del grado de obturación, al ir proporcionando una pequeña limpieza en los emisores.

Por otra parte, el hecho de que en cada sesión de trabajo hubiese que desmontar los ramales y

montarlos a la sesión siguiente, con lo que el ajuste de la presión era muy complicado, pudo también modificar en alguna medida los resultados.

El intervalo de temperaturas durante los ensayos estuvo comprendido entre los 21°C-28°C con el agua limpia y entre los 26,5-28 °C con el agua residual depurada con tratamiento primario. Según los resultados de Rodríguez-Sínobas y col.(1999), no tendría influencia significativa la temperatura en la variación de caudal en estos emisores (autocompensantes, y de laberinto con régimen turbulento).

Ensayos a las 620 horas de funcionamiento en los seis tipos de emisores.

Desviación del caudal respecto al nominal (D_q) y grado de obturación (G.O.)

En la tabla 5 se muestra la variación de caudales de los emisores trabajando con agua residual depurada con tratamiento primario (A.R.D.T°1°) y con agua residual depurada con tratamiento primario más sistema de filtrado (A.R.D.T°1°F), inicial y a las 620 horas de funcionamiento a presión nominal; además de la desviación del caudal a las 620 horas de funcionamiento respecto al nominal (D_q) y grado de obturación (G.O.).

Lo primero que se observa en la tabla es que para los dos tipos de aguas residuales utilizadas el

Emisores	q_n (lh ⁻¹)	Agua residual depurada tratamiento primario				Agua residual depurada tratamiento primario más sistemas de filtrado			
		$Q_{inicial}$ (lh ⁻¹)	Q_{620h} (lh ⁻¹)	D_q (%)	G.O. (%)	$Q_{inicial}$ (lh ⁻¹)	Q_{620h} (lh ⁻¹)	D_q (%)	G.O. (%)
Gotero A	4	3,04	0,02	-99,5	99,34	4,54	3,90	-2,5	14,09
Gotero B	4	3,73	3,18	-20,5	14,74	3,74	3,25	-18,75	12,86
Gotero C	4	3,79	2,98	-21,58	21,37	3,74	3,25	-14,47	13,10
Gotero D	4	4,11	4,21	-52,5	52,97	4,03	4,18	-5	8,65
Gotero E	4	4,31	4,32	-31,5	37,44	4,37	4,23	-1	10,81
Gotero F	4	4,13	3,70	-7,5	10,41	4,12	3,75	-6,25	8,98

Tabla 5. Variación, desviación de caudales y grado de obturación de los emisores a las 620 horas de funcionamiento a presión nominal (100 kPa)

signo negativo que aparece en el término de desviación de caudales, significa que los goteros han disminuido de caudal a medida que aumentan las horas de funcionamiento por lo que el grado de obturación ha ido aumentando. El orden de los goteros de mayor a menor grado de obturación es:

- Para el A.R.D.T^o.1^o : A-D-E-C-B-F

- Para el A.R.D.T^o.1^o.F : A-C-B-E-F-D

Se ha realizado un análisis estadístico de varianza (ANOVA), considerando los tipos de aguas utilizadas y los emisores, y se han separado las medias (LSD). De los resultados obtenidos, se observa que por la calidad del agua no hay diferencia significativa del grado de obturación entre el ensayo con agua limpia (A.L.) a las 100 h, con (A.R.D.T^o.1^o) a las 100 h y con agua residual depurada con tratamiento primario más filtrado (A.R.D.T^o.1^o.F) a las 620 h. Sin embargo, sí que existe diferencia entre este grupo y el ensayo con agua residual depurada con tratamiento primario (A.R.D.T^o.1^o) a las 620 h. Por emisores, se observan dos grupos entre los que si hay diferencia significativa en el grado de obturación: (A,D,E) y (D,E,C,B,y F), de lo que se deduce que hay diferencias significativas entre el grado de obturación del gotero A y el de los goteros C, B y F.

Las temperaturas se mantienen dentro de análogos intervalos al ensayo anterior por lo que el efecto de la temperatura sobre la variación del caudal se considera despreciable.

Variación del caudal de los emisores a lo largo del tiempo a presión nominal.

En los datos de caudales de los emisores a lo largo del tiempo, para cada tipo de agua se ha observado que en determinados emisores (gotero D), al aumentar la presión en determinados momentos (100h, 200h, 300h, 400h, 500h, y 600h) se produce una recuperación del caudal, hecho que nos ayuda

a proponer la recomendación del aumento de la presión al finalizar cada sesión de trabajo para prevenir obturaciones en los emisores.

Posteriormente, se han sometido a un análisis estadístico de regresión (lineal, logarítmica, polinómica, potencial y exponencial), con lo que se ha obtenido las curvas ajustadas para cada tipo de gotero y agua. Se observa que la tendencia generalizada del comportamiento de los caudales con el tiempo ha sido de tipo polinómica, y las ecuaciones que las representan se muestran en la tabla 6.

Variación de la ecuación caudal-presión (Q-p) de los emisores con el tiempo.

Se muestran en la tabla 7 los parámetros característicos de la ecuación de gasto de los emisores con los dos tipos de aguas residuales, en el inicio de la etapa de cada ensayo (Q_{inicial}) y al finalizar la etapa de cada ensayo (Q_{620h}), al objeto de comparar la variación de las ecuaciones a causa de la obturación por el tiempo de funcionamiento.

En primer lugar se observa, que salvo en el gotero D y el A con el A.R.D.T^o.1^o, el coeficiente de correlación R² es cercano a la unidad, lo que significa, que la función potencial calculada caracteriza bien los datos obtenidos. En el gotero D y en algunos casos en el A, el coeficiente tiende a cero, lo que significa que su curva de gasto no vendría dada por una función potencial, sino por una función constante, lo que concuerda con su carácter auto-compensante. El signo negativo de x en el gotero D significa que el caudal disminuye al aumentar la presión de trabajo.

En segundo lugar, se ha realizado un análisis de varianza para los parámetros característicos de la curva caudal-presión, parámetro k y exponente de descarga x. Haciendo la comparación de medias por goteros encontramos que no hay diferencias significativas en el valor de k entre goteros, pero si las hay en el valor de x, entre los goteros C,E,F,B y

Emisor	Agua residual depurada tratamiento primario		Agua residual depurada tratamiento primario más sistema de filtrado	
	Ecuación	R ²	Ecuación	R ²
A	Q=0,003t ² -0,0609t+2,93	0,72	Q=0,0002t ² -0,0232t+4,58	0,88
B	Q=-4E-05t ² +0,0033t+3,58	0,69	Q=8E-05t ² -0,0123t+3,77	0,92
C	Q=-5E-05t ² +0,0033t+3,68	0,81	Q=9E-05t ² -0,0133t+3,76	0,85
D	Q=-4E-05t ² -0,0205t+4,19	0,56	Q=7E-05t ² -0,0099t+4,18	0,81
E	Q=-5E-05t ² -0,0022t+4,38	0,85	Q=0,001t ² -0,0141t+4,48	0,87
F	Q=-4E-05t ² +0,0038t+4,07	0,53	Q=2E-05t ² -0,0041t+4,0365	0,78

Tabla 6. Ecuaciones caudal-tiempo para cada emisor con dos tipos de aguas residuales depuradas a presión nominal (100 kPa)

GRADOS DE OBTURACIÓN ALCANZADOS POR EMISORES A LO LARGO DE UN TIEMPO TRABAJANDO CON AGUAS RESIDUALES DEPURADAS

Emisores	Etapas	Agua residual depurada con tratamiento primario			Agua residual depurada tratamiento primario más sistemas de filtrado		
		k	x	R ²	k	x	R ²
Gotero A	Q _{inicial}	0.76	0.32	0.85	1.47	0.24	0.97
	Q _{620h}	-	-	-	1.53	0.20	0.95
Gotero B	Q _{inicial}	0.53	0.42	0.99	0.60	0.40	0.99
	Q _{620h}	0.47	0.42	0.99	0.41	0.45	0.99
Gotero C	Q _{inicial}	0.57	0.41	0.99	0.49	0.44	0.99
	Q _{620h}	0.33	0.48	0.98	0.40	0.46	0.99
Gotero D	Q _{inicial}	0.58	0.003	0.02	0.70	0.006	0.02
	Q _{620h}	0.33	0.33	0.60	0.47	-0.02	0.32
Gotero E	Q _{inicial}	0.58	0.44	0.99	0.70	0.40	0.99
	Q _{620h}	0.33	0.47	0.99	0.47	0.46	0.99
Gotero F	Q _{inicial}	0.57	0.43	0.99	0.77	0.37	0.98
	Q _{620h}	0.75	0.35	0.98	0.39	0.48	0.99

Tabla 7. Comparación de los parámetros de la ecuación de gasto inicial y a las 620 horas de funcionamiento.

el grupo homogéneo formado por el A y E que además coincide con la distinción entre goteros no autocompensantes (primer grupo homogéneo) y autocompensantes (segundo grupo homogéneo). Si se hace la comparación de medias por tratamientos, llamando T1= parámetros de la ecuación nominal del gotero; T2=parámetros ecuación en el momento inicial con A.R.D.T°.1°; T3= parámetros ecuación a las 620 horas con A.R.D.T°.1°; T4=parámetros ecuación en el momento inicial con A.R.D.T°.1°F; T5= parámetros ecuación a las 620 horas con A.R.D.T°.1°F; encontramos que en el valor de **k** se distinguen dos grupos homogéneos y claramente hay diferencias significativas en los valores de **k** correspondientes a la ecuación nominal del gotero y la obtenida a las 620 horas con agua residual depurada con tratamiento primario. Sin embargo no hay diferencias significativas en el valor de **x**, constituyendo un solo grupo homogéneo.

Obtención del coeficiente de variación a la obturación (CV_o)

El coeficiente de variación debido a la obturación del emisor a lo largo del tiempo lo hemos obtenido para cada clase de agua residual ensayada. Además se ha supuesto que el coeficiente de variación debido a la temperatura CV_t puede despreciarse tal como ya se ha comentado. Luego, el CV sólo se considera influenciado por el coeficiente de variación debido a la fabricación (CV_k) y el de obturación debido a la calidad del agua utilizada (CV_o), como se deduce de la ecuación 4. En la tabla 8 aparecen los distintos coeficientes de variación calculados para cada emisor, en tanto por uno, a las 620 horas de funcionamiento con las dos clases de agua residual depurada utilizadas.

Tipo de Valoración	Emisor						
	A	B	C	D	E	F	
A.R.D.T°.1°	CV ²	4	0.010	0.00480	1.3628	0.01431	0.00034
	CV _k ²	0.00116	0.0012	0.00015	0.0036	0.00094	0.0009
	CV _o ²	3.998	0.0087	0.00358	1.3616	0.01399	0.00055
A.R.D.T°.1°F	CV ²	0.00054	0.00394	0.00047	0.0019	0.00014	5.8E-05
	CV _k ²	0.00116	0.0012	0.00015	0.0036	0.00094	0.0009
	CV _o ²	0.00061	0.00272	0.00031	0.0016	0.0008	0.00086

Tabla 8. Coeficientes de variación de los emisores a las 620 horas de funcionamiento con las dos clases de aguas residuales depuradas utilizadas.

Con el A.R.D.T°.1° se ha obtenido un CV_o mayor que el CV_k para todos los goteros (A,B,C, D,E), excepto en el gotero F, que ha ocurrido lo contrario. Sin embargo con el A.R.D.T°.1°F se ha obtenido un predominio del CV_k sobre el CV_o en más cantidad de goteros (A,D,E y F); lo que nos indica que calidad del agua residual influye claramente en el C.V. En las figuras 2 y 3 se han representado la variación del CV_o con el tiempo con las dos clases de aguas residuales utilizadas. Se observa que excepto en los goteros B,C, y F con el agua residual depurada con tratamiento primario, y el A y F con agua residual depurada con tratamiento primario más sistema de filtrado, el CV_o aumenta con el tiempo de funcionamiento.

CONCLUSIONES

Como conclusiones de los ensayos realizados hay que destacar, en primer lugar, que la calidad del agua residual depurada influye muy significativamente en el grado de obturación de los emisores. Se recomienda, para disminuir el grado de obturación, al menos un tratamiento primario al agua resi-

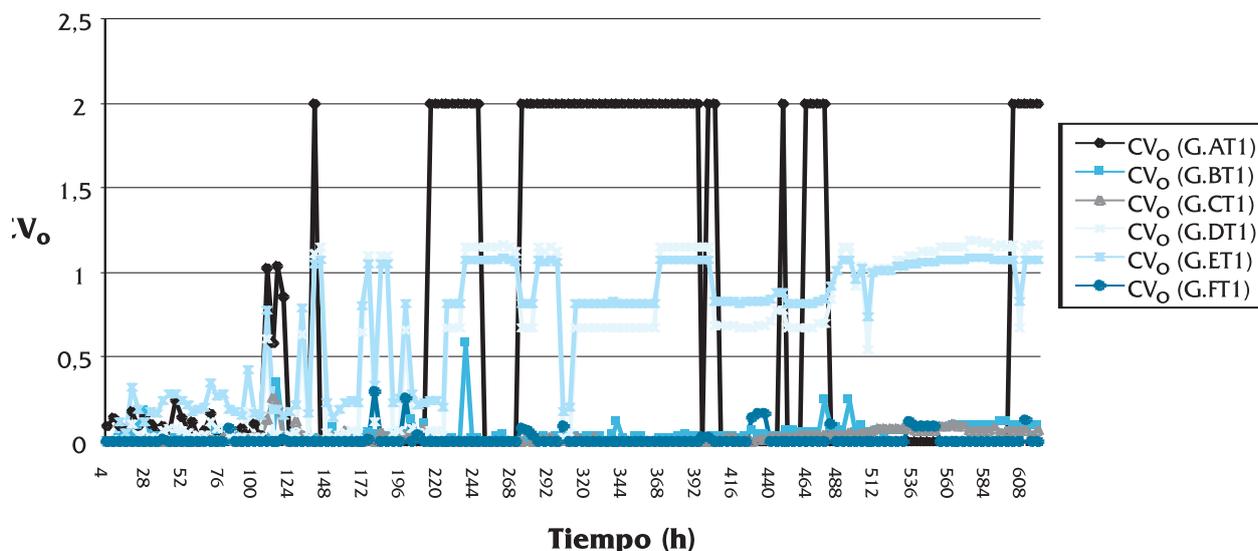


Figura 2. Coeficiente de Variación de obturación con el tiempo. Agua residual depurada con tratamiento primario.

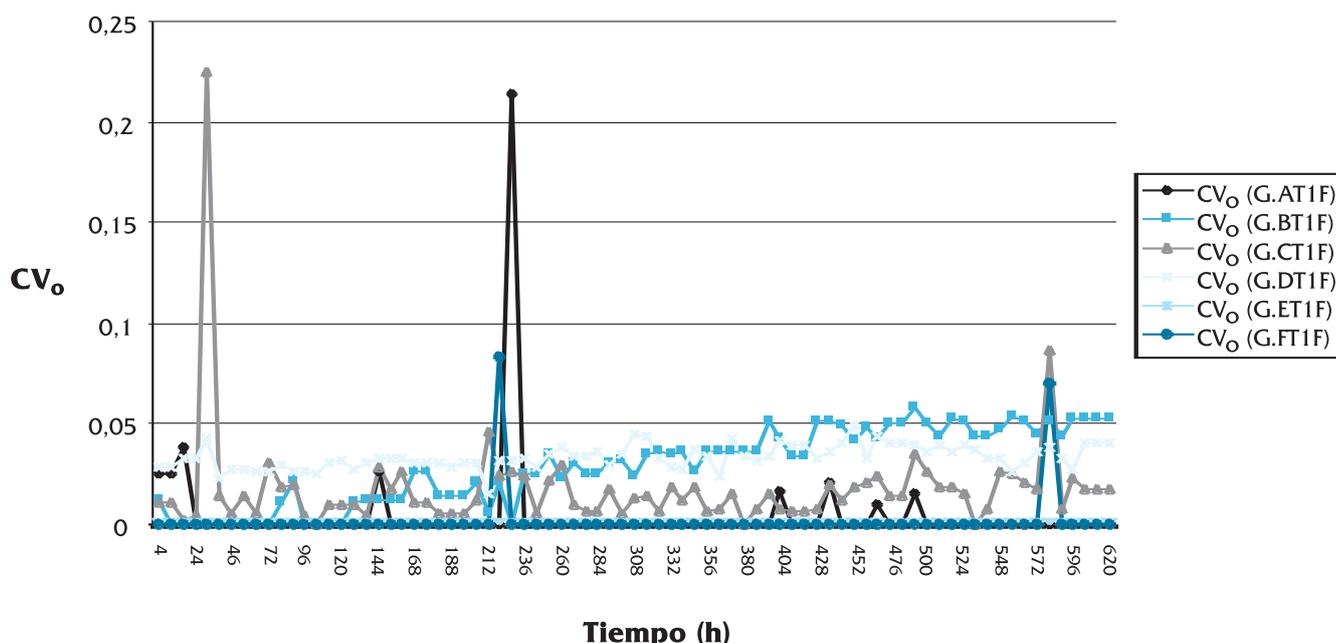


Figura 3. Coeficiente de Variación de obturación a 100 KPa. Agua residual depurada con tratamiento primario más sistema de filtrado.

dual más una filtración que reduzca la cantidad de sólidos en suspensión hasta valores equiparables a un tratamiento secundario de depuración.

Con respecto a la influencia del tipo de emisor en la obturación se obtiene que el orden de mayor a menor grado de obturación para el agua residual depurada con tratamiento primario fue: A-D-E-C-B-F ; y para el agua residual con tratamiento primario más sistema de filtrado fue: A-C-B-F-E-D, quedando claro que el gotero A es el que antes se

obtura independientemente del tipo de agua. Sin embargo, el gotero D que también es autocompensante se comporta muy mal con el agua sin filtrar, pero es el que mejor se comporta con el agua residual depurada con tratamiento primario más un sistema de filtrado.

Se recomienda el aumento de la presión al finalizar cada sesión de trabajo para prevenir obturaciones en los emisores. Lo que sería objeto de un estudio posterior es evaluar hasta que presión ha-

bría que aumentar para que la instalación no se encareciese, y sin embargo fuese efectivo en la prevención de la obturación.

Y por último, concluir que el coeficiente de variación de fabricación, depende de la calidad del agua residual depurada, predominando el CV_o frente al CV_k en la mayoría de los emisores estudiados, cuando se utilizan aguas residuales depuradas con tratamiento primario. Cuando la calidad del agua residual mejora, agua residual depurada con tratamiento primario más sistema de filtrado, es el CV_k el que predomina en la mayoría de los goteros.

LÍSTA DE SÍMBOLOS

	coeficiente de variación del emisor.
CV	coeficiente de variación del emisor debido al fabricante.
CV_k	coeficiente de variación del emisor debido a la obturación.
CV_o	coeficiente de variación del emisor debido a la temperatura.
CV_r	Disminución de caudal a las 100 horas de funcionamiento respecto al caudal nominal (%).
D_q	grado de obturación (%).
G.O.	constante de la ecuación de gasto.
k	presión de funcionamiento (kPa).
p	caudal medio de cada emisor (lh ⁻¹).
q̄	caudal medio de cada emisor al finalizar el ensayo (lh ⁻¹).
q̄_r	caudal medio de cada emisor al iniciar el ensayo (lh ⁻¹).
q̄_i	gasto, caudal (lh ⁻¹).
Q	gasto del gotero a las 620h de funcionamiento (lh ⁻¹).
Q_{620h}	gasto del gotero en el inicio de cada ensayo (lh ⁻¹).
Q_{inicial}	caudal nominal (lh ⁻¹).
q_n	coeficiente de correlación.
R²	exponente de descarga de la ecuación de gasto.
x	

REFERENCIAS

- Abbott, J.S. 1988. Microirrigation- world wide usage report by microirrigation working group. Intl. Committee on Irrig. and Drain. Bull., 34:1-12.
- Adin, A. y M. Sacks. 1991. Dripper-clogging factors in wastewater irrigation. J. Irrig. Drain. Engn. 117(6): 813-826.
- Asano, T., y Petty Grove, G.S. 1987. Using reclaimed municipal wastewater for irrigation. Cal.Agric., 41 (3-4): 15-18.
- Bratls, V.F.; I.P. Wu y H.M. Gitlin. 1981. Drip irrigation uniformity considering emitter plugging. Trans. Amer. Soc. Agric. Eng., 24(5):1234-1240.
- Bucks, D. A.; Nakayama, F.S. y Gilbert, R.G. 1979. Trickle irrigation water quality and preventive maintenance. Agricultural Water Management, 2. USA:149-162.
- Chica, R. 1999. Uso de agua residual depurada en sistemas de riego por goteo. Tesis doctoral. Departamento de Agronomía. Universidad de Córdoba.
- Cooper, B. E. 1969. Analysis of variance-II Factorial analysis. Statistics for experimentalist, Pergamon, Tarrytown, N. Y., 144-170.
- Gamble, J. 1986. A trickle irrigation system for recycling residential wastewater on fruittrees. Hort. Sci. 21(I): 28-32.
- Gilbert, R.G.; F.S. Nakayama; D.A.Bucks; O.F. French y K.C. Adamson. y R.M. Jonhson. 1982. Trickle irrigation: Predominant bacteria in treated Colorado Riverwater and biologically clogged emitters. Irrig. Sci. 3:123-132.
- Gilbert, R.G. y H.W.Ford. 1986. Operational principles emitter clogging. In Trickle Irrigation for Crop Production , eds. F.S. Nakayama and D.A. Bucks, 142-163. New York: Elsevier.
- Gilbert, R.G.; F.S. Nakayama; D.A.Bucks; O.F. French y K.C. Adamson. 1981. Trickle irrigation: emitter clogging and flow problems. Agric. Water Management, 3:159-178.
- Godet, J.L. y F. Brissaud. 1991. Utilisation des eaux usées en irrigation. Revue de l'Eau et de l'Aménagement, 9:20-26.
- González, A.; J. Ollero. 1997. Análisis estadístico con Statgraphics. Grupo Editorial Universitario y Cópías Plá-cido. Granada.
- Iqbal, A.1987. Wastewater for irrigation in arid regions. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 113, N°2.
- Juanico, M.; Y. Azov; B. Teltsch y G. Shelef. 1995. Effect of effluent addition to freshwater reservoir on the filter clogging capacity of irrigation water. Water Research. Vol. 29,7,: 1695-1702.
- Lau, L.S.; D.R. McDonald, y I. Wu. 1984. Improved emitter and network system desing for reuse of wastewater in drip irrigation. Proc., Water Reuse Symp.III, American Wate Works Association, Denver, Colorado: 452-471.
- Lau, L.S.; R.H. Young; y G.P. Young. 1981. Post-secondary treatment of effluent for drip irrigation. Tech. Rep. N°135, Water Resour. Res. Ctr., Univ. of Hawaii at Manoa, Hawaii: 452-471.
- Lesavre, J; A. Zairi. 1988. Epuration des eaux residuales par epandage souterrain sous pression: conception et evaluation de la filiere de traitement. Agence de léau Sei-

- ne-Normandie. Centre de Recherche et d'Essais Appliqués aux techniques de l'Eau.
- Massoud, A., Tajrishy, D. J. Hills, and G. Tchobanoglous. 1994. Pretreatment of secondary effluent for drip irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 120 n°4: 716-731
- McDonald, D. R.; L. Lau; I.P. Wu; H.K. Gee, y S.C. Young. 1984. Improved emitter and network system desing for wastewater reuse in drip irrigation. Tech. Rep. N°163, Water Resour. Res. Ctr., Univ. of Hawaii at Manoa, Hawaii.
- Nakayama, F.S., And D.A. Bucks. 1991. Water quality in drip/trickle irrigation: A review. *Irrig. Sci.* 12: 187-192.
- Nakayama, F.S.; D.A. Bucks. 1986. Trickle irrigation for crop production. *Developments in Agricultural Engineering* 9. ELSEVIER. Amnsterdand. 383p.
- Oron, G. y Y. Demalach. 1987. Reuse of domestic wastewater for irrigation in arid zons: a cause study. *Water Resources Bulletin, American Water Resources ass*, Octubre.
- Puig, J.; F. Ramírez. 1999. Comportamiento del filtro de anillas en la utilización de aguas residuales de industrias cárnicas en riego por goteo. XVI Congreso Nacional de Riegos. Murcia.
- Ravina, I.; E. Paz; G. Sagi; A. Schischa; A. Marcu, Z. Yechiely Y; Z. Sofer; Y. Lev. 1995. Performance evaluation of filters and emitters with secondary effluent. *Microirrigation for a changing world. Proceedings of the Fifth International Microirrigation Congress*, Orlando, Florida: 244-249.
- Rodríguez-Sínobas, L.; L. Juana y A. Losada. 1999. Effects of temperature changes on emitter discharge. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* Vol. 125, N° 2: 64-73.