

TEMPERATURA DEL AGUA Y SU EFECTO EN EL FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DE CUATRO MODELOS DE GOTEROS

WATER TEMPERATURE AND ITS EFFECT ON HYDRAULIC OPERATION OF FOUR DRIPPER MODELS

Jesús Enrique López A.¹; José Jesús González M.²; Ramón Lizárraga J.³; Tomás Díaz V.⁴; Leopoldo Partida R.⁵; José Oscar Armenta A.⁶

Fecha de recepción: Agosto 15 de 2013

Fecha de aceptación: Diciembre 05 de 2013

RESUMEN

Uno de los principales factores a los que se exponen los goteros y/o cintas de riego en el campo, es la temperatura del aire y la temperatura del agua. En el estado de Sinaloa, localizado en el noroeste de la República Mexicana, se presenta un amplio margen de variación en la temperatura que va desde los 48 °C hasta los 6 °C, por lo que se realizó un estudio con el objeto de conocer el efecto de la temperatura del agua sobre el funcionamiento hidráulico de cuatro modelos de goteros integrados, así como, el comportamiento de la uniformidad y variación de la descarga. Se consideraron cuatro modelos comerciales de cinta de riego con gotero plano integrado (tipo pastilla) en la zona del valle de Culiacán, Sinaloa, México; se comparó el caudal medido con el caudal calculado con las especificaciones hidráulicas de los fabricantes, se hizo variar la presión y la temperatura del agua. Así mismo, se obtuvo el Coeficiente de Uniformidad utilizando tres modelos diferentes: coeficiente de Christiansen, coeficiente de Hart y Reynolds y el coeficiente de Criddle, Davis, Pair y Shockley. Todos los goteros evaluados mostraron un coeficiente de uniformidad superior al 95%, independientemente del modelo utilizado, mientras que el coeficiente de variación fue menor al 4%.

Palabras clave: Coeficiente de uniformidad, coeficiente de variación, emisores, gotero integral, riego por goteo

1 Profesor investigador. M.Sc. Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Sinaloa, México. profe.jesus@uas.edu.mx.

2 Ingeniero agrónomo. Agroindustrias del Norte. Carretera Eldorado sur 4625, campo El Diez, Culiacán, Sinaloa, México. gonmejo@gmail.com.

3 Profesor investigador. M.Sc. Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Sinaloa, México. rljimenez_2000@hotmail.com.

4 Profesor investigador. Ph.D. Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Sinaloa, México. tdiaz10@hotmail.com.

5 Profesor investigador. Ph.D. Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Sinaloa. México. parpolo@yahoo.com.mx.

6 Profesor investigador. M.Sc. Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Sinaloa, México. joaa20@uas.edu.mx.

ABSTRACT

One of the main factors to which field drippers and/or irrigation strips are exposed to is air and water temperature. The state of Sinaloa, located in northwest Mexico, presents a wide range of temperature variation, from 48 °C to 6 °C; consequently, a study was conducted in order to determine the effect of water temperature on the hydraulic operation of four integrated dripper models, as well as the uniformity and variation of discharge performance. We considered four commercial irrigation strip models, with an integrated flat button dripper, in the Culiacan valley area in Sinaloa state, Mexico. The measured flow rate was compared to the calculated flow rate, according to the manufacturers' hydraulic specifications. Water pressure and temperature were varied. In addition, the uniformity coefficient was obtained using three different models: Christiansen's coefficient, the Hart and Reynolds coefficient, and the Criddle, Davis, Pair, and Shockley coefficient. All evaluated drippers showed a uniformity coefficient higher than 95%, regardless of the model used, while the variation coefficient was less than 4%.

Keywords: Variation coefficient, drip irrigation, drippers, integrated dripper, uniformity coefficient.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de riego por goteo constituyen una alternativa sumamente importante para la agricultura de riego en Sinaloa, México, no sólo por las altas eficiencias en el ahorro de agua, sino también por el incremento de la productividad al hacer un uso más eficiente de la interacción del agua, suelo, fertilizante y planta (García, 2010).

En el estado de Sinaloa existe una superficie de riego de 797231 hectáreas distribuidas en diferentes Distritos y Unidades de Riego (CONAGUA, 2011a; CONAGUA, 2010), de acuerdo con CONAGUA (2011b) durante el ciclo agrícola 2009 - 2010 se regaron 722589 hectáreas (90,6% del total), de las cuales 38378 hectáreas correspondieron a hortalizas (5,3%); considerando la importancia económica de las hortalizas, se puede afirmar que la mayoría de las superficies de hortalizas se riegan con sistemas de riego por goteo;

lo anterior proporciona una idea del gran potencial que actualmente existe en el Estado para el desarrollo de una agricultura basada en el riego presurizado y considerando la liberación comercial, se ha incrementado el establecimiento de sucursales de empresas distribuidoras de sistemas de riego por goteo en las más importantes ciudades de tradición hortícola en el estado de Sinaloa, México, para atender los valles agrícolas de los municipios de Culiacán, Ahome y Guasave (García, 2010).

El horticultor espera con el uso del sistema de riego por goteo, un incremento en la productividad de sus cultivos, para ello debe hacer una aplicación eficiente y uniforme del agua y fertilizante, para lo cual, el funcionamiento hidráulico del emisor debe ser el correcto. Buscando obtener la mayor uniformidad de aplicación emplea diversos tipos de emisores, con diferente caudal y material de fabricación, considerando el tipo de suelo, cultivo y preferencias o confianza

en determinadas marcas de emisores. Por lo regular se trata de mantener una uniformidad alta, de 90% o más; sin embargo existen diversos factores que afectan el funcionamiento hidráulico de los emisores y por tanto la uniformidad (Unland *et al.*, 2011).

La temperatura del agua es un factor importante que se debe considerar y generalmente no se hace; el problema se hace más grave, si se considera además el uso de invernaderos y acolchados plásticos, donde la temperatura puede incrementarse hasta 7 °C e incluso por arriba de 10 °C, dependiendo de la localización geográfica y de las demás condiciones meteorológicas, como ha sido reportado por algunos investigadores (Unland *et al.*, 2011; Jaimez *et al.*, 2009; Montilla *et al.*, 2009).

De acuerdo con Ben (1984) y Pizarro (1996), la ecuación general del gotero expresa el funcionamiento hidráulico del emisor, el cual está en función del régimen de flujo dentro del mismo:

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

Donde q es el caudal del emisor en $L h^{-1}$; p es la presión de operación expresada en bar; k y x son parámetros que se obtienen mediante un análisis de regresión simple entre los valores de caudal y carga de presión.

Ben (1984), concluye que el exponente x en la ecuación (1) es el valor que describe la intensidad y régimen de flujo a través del emisor, para flujo laminar $x = 1$, y para un flujo completamente turbulento $x = 0,5$. Mientras que Pizarro (1996), menciona que el valor de x es una medida de la sensibilidad de los emisores a la variación de la presión y es afectado por el tipo de emisor o régimen de flujo.

Existen diversos factores que afectan el funcionamiento hidráulico de los emisores en goteo, entre los que destacan las variaciones de fabricación, la variación de la presión, el taponamiento u obturación de emisores y las variaciones en la temperatura del agua a lo largo de las líneas de riego (Ben, 1984). La temperatura del agua afecta directamente la viscosidad de la misma, en goteros de flujo con régimen turbulento, las variaciones son pequeñas, sin embargo, en emisores con régimen laminar, las diferencias de descarga de caudal pueden llegar hasta duplicarse (Peña *et al.*, 1977).

Teniendo en cuenta lo anterior, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal analizar la uniformidad de descarga de cuatro cintas de riego con goteros integrados tipo pastilla, al considerar el efecto de la temperatura del agua sobre el funcionamiento hidráulico de los mismos, verificando así, las especificaciones técnicas que los fabricantes manejan.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo experimental se desarrolló en las instalaciones de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Sinaloa, localizada en la zona agrícola del Valle de Culiacán. El sitio experimental se ubica al noroeste de la República Mexicana en el estado de Sinaloa (Fig.1); su localización geográfica es 24° 48' 30" de latitud norte y 117° 24' 30" de longitud oeste; altitud de 38 metros sobre el nivel del mar (msnm); precipitación promedio anual de 680 mm; la humedad relativa máxima promedio es de 75% y la mínima de 57%; temperatura del aire máxima promedio de 41,8 °C y mínima de 7,4 °C.



Figura 1. Localización geográfica del sitio experimental.

Descripción de los goteros evaluados

Se consideraron cuatro modelos de cinta de riego con gotero integral tipo pastilla o gotero plano (Siberline P1, Streamline 16060,

Eurodrip y SuperTyphoon 16125), en la Tabla 1 se muestran los datos técnicos de los mismos.

Tabla 1. Características hidráulicas de los goteros seleccionados.

Gotero	Di (mm)	Grosor de pared (mm)	Distancia entre goteros (cm)	Caudal nominal (L h ⁻¹)	Caudal a la máxima presión de trabajo (L h ⁻¹)	Máxima Presión de trabajo (bar)
Siberline P1	16,10	0,15	30	1,50	1,00	0,50
Streamline	16,20	0,15	30	1,10	0,91	0,65
Eurodrip	16,10	0,15	30	1,18	1,20	1,03
S. Typhoon	16,20	0,31	30	1,60	1,88	1,40

La ecuación (1) representa la ecuación general del gotero, y con los datos caudal-presión obtenidos de las hojas técnicas que los fabricantes manejan para cada uno de los goteros (Eurodrip, 2012; Netafim, 2012a, Netafim 2012b, Irritec, 2012), se obtuvo la ecuación que describe el funcionamiento hidráulico de cada uno de ellos.

Para el gotero Siberline P1, la ecuación es la siguiente:

$$q = 1.499 p^{0,564} \quad (2)$$

-Donde q es el caudal en L h⁻¹ y p es la presión en bar.

Para el gotero Streamline 16060, la ecuación obtenida es:

$$q = 1,107 p^{0,454} \quad (3)$$

-Para el gotero Eurodrip, su ecuación es la siguiente:

$$q = 1,181 p^{0,574} \quad (4)$$

-Mientras que para el gotero SuperThypocon 16125, la ecuación del gotero resultante fue:

$$q = 1,599 p^{0,479} \quad (5)$$

Procedimiento de evaluación

Para evaluar la diferencia de caudal debido al cambio de temperatura en el agua se utilizó un banco de prueba instalado en el invernadero de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Sinaloa (Fig. 2). El banco de prueba consistió en dos depósitos de agua de 200 litros de capacidad, bomba de impulsión de agua, centro de energía eléctrica, tubería de PVC, válvulas,

manómetro, filtro, calentadores de agua, termómetros, banco de prueba compuesto por dos tramos de varilla de 25 metros de longitud unidas paralelamente por tramos de 10 cm del mismo material (esta estructura permitió sostener la cinta de riego a una altura de 1,5 m del nivel del suelo), un polín de 25 metros de longitud (utilizado para sostener los recipientes volumétricos), escuadras para sostener las estructuras, canaleta receptora de agua, embudos, recipientes volumétricos. Se propone una metodología para obtener las relaciones caudal-presión de los goteros evaluados, tomando en cuenta la Norma Mexicana NMX-O-082-SCFI-2001 titulada "Goteros para sistemas de riego - Especificaciones y métodos de prueba (SE, 2001).

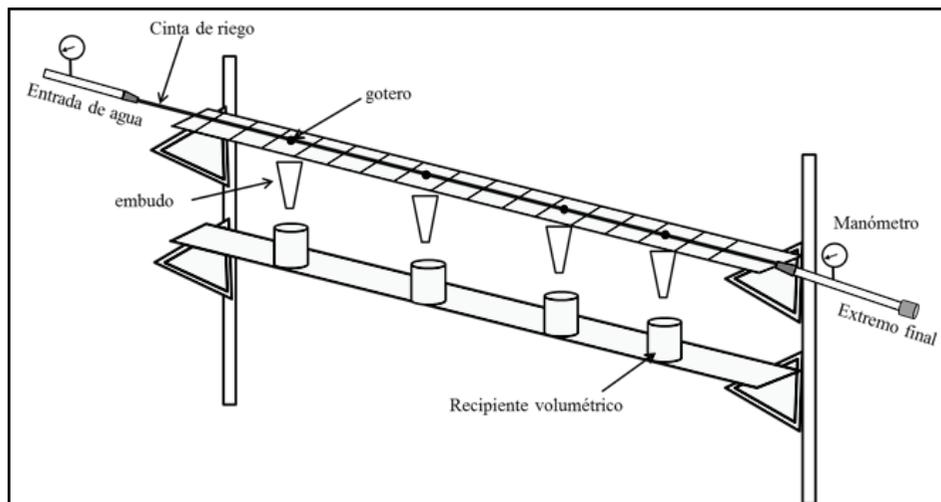


Figura 2. Esquema del banco de prueba instalado

Se utilizaron tres tramos de cinta de riego para cada uno de los modelos de goteros evaluados, cada tramo con un longitud de 25 metros (tres repeticiones para cada modelo de cinta). Fueron seleccionados 10 goteros uniformemente espaciados (2,5 m) por cada

tramo. Además, se colocó un embudo debajo de cada gotero seleccionado y un recipiente volumétrico de plástico para recolectar el agua. Cada tramo se conectó de manera independiente a la bomba para evaluarlos por separado. Fueron evaluadas cuatro

temperaturas diferentes en el agua: 15, 30, 45 y 60 °C. Para cambiar la temperatura del agua por debajo de la temperatura ambiente, se utilizaron barras de hielo; mientras que para calentar el agua e incrementar la temperatura por encima de la temperatura ambiente, se utilizaron 4 calentadores de 1000 watts; con la ayuda de un par de termómetros se midió la temperatura para mantenerla constante durante la prueba. Por otro lado, se midió la temperatura del agua en el depósito (fuente de abastecimiento) y a la salida del gotero, la diferencia de temperaturas entre las lecturas (entrada y salida) no debió exceder de un ± 1 °C. La temperatura ambiente promedio en el exterior fue de 24,6 °C y 32 °C en el interior del invernadero.

Una vez establecida la temperatura del agua, se hizo variar la presión en tres valores diferentes: 0,5, 0,75 y 1,0 bar. Para medir también el caudal en el gotero en función de la presión en el sistema. Para variar la presión en la cinta de riego se utilizó una válvula de compuerta, la cual se abría o cerraba hasta generar la presión requerida.

La diferencia de presión entre la entrada y salida de la línea que se evaluaba no debía exceder el $\pm 1\%$. Se utilizaron tres repeticiones para cada tratamiento, de esta manera se obtuvieron para cada gotero evaluado: tres mediciones por tramo, 9 mediciones por presión y 27 mediciones para cada temperatura establecida.

Con las tres repeticiones de cada tramo se calculó el valor medio del caudal para cada gotero evaluado. El agua fue recolectada en los recipientes y se midió con una probeta graduada, el tiempo de medición fue de 5 minutos para cada prueba; el caudal se calculó

con la ecuación:

$$q = \frac{V}{t} \quad (6)$$

Donde q es el caudal en litros por hora ($L h^{-1}$), V es el volumen recolectado en los recipientes (litros, L) y t es el tiempo de duración de la medición (horas, h).

Una vez obtenidos los datos de los diferentes tratamientos, se realizó una regresión lineal simple para obtener el modelo matemático que mejor se ajusta y comparar los modelos obtenidos con los proporcionados por los fabricantes para verificar su cumplimiento y variación (Ecuaciones 2, 3, 4 y 5). La ecuación (7) muestra la linealización de la ecuación (1).

$$\log \bar{q}_i = \log k + x \log \bar{p}_i \quad (7)$$

Para calcular el valor del exponente x, se utiliza la ecuación (8).

$$x = \frac{\sum[(\log p_i)(\log q_i)] - \frac{1}{n} \sum(\log p_i) \sum(\log q_i)}{\sum(\log p_i)^2 - \frac{1}{n} (\sum \log p_i)^2} \quad (8)$$

Para calcular las medias de q_i y p_i se utilizaron las ecuaciones (9) y (10).

$$\log \bar{q}_i = \frac{\sum(\log q_i)}{n} \quad (9)$$

$$\log \bar{p}_i = \frac{\sum(\log p_i)}{n} \quad (10)$$

Para determinar el valor de la constante k se utilizó la ecuación (11).

$$k = \text{antilog}[\log \bar{q}_i - x \log \bar{p}_i] \quad (11)$$

Coefficientes de Uniformidad y Variación

En la literatura se manejan varios modelos matemáticos para determinar el coeficiente de uniformidad en la descarga de emisores en un sistema de riego; el primero de los coeficientes utilizados fue el coeficiente de Christiansen en 1942; aunque el modelo se determinó para evaluar la uniformidad en el riego por aspersión, su uso se ha extendido a riego por goteo (Maroufpoor *et al.*, 2010, Cun *et al.*, 2011).

Con el propósito de realizar un análisis comparativo entre diferentes Coeficientes de Uniformidad y su afectación por las variaciones en la temperatura del agua, en este trabajo se determinó el CU con los modelos propuestos por Christiansen (ecuación 12), Criddle, Davis, Pair y Shockley (ecuación 13) y, Hart y Reynolds (ecuación 14), (Maroufpoor *et al.*, 2010):

$$CU = 100 \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \mu|}{\sum_{i=1}^n x_i} \right] \quad (12)$$

$$CU = 100 \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \mu|}{\mu \frac{n}{4}} \right] \quad (13)$$

$$CU \cong 100 \left[1 - \left(\frac{0.798 \sigma}{\mu} \right) \right] \quad (14)$$

Donde CU es el Coeficiente de Uniformidad (%); n es el número de datos considerados; x_i es el volumen de agua recogido de cada gotero; μ es la media aritmética de las mediciones; σ es la desviación estándar del total de las mediciones.

Las variaciones en la fabricación de los emisores, se miden a través del coeficiente de variación (CV), este dato es un término

estadístico característico, y depende del diseño del emisor, de los materiales utilizados en su fabricación y del cuidado y tolerancias admitidas en el proceso de la misma, su valor varía entre 2 y 20 % (Gil *et al.*, 2002). Este parámetro es uno de los que más afecta el funcionamiento hidráulico de los emisores (Keller, 1980).

Prácticamente es imposible construir un conjunto de emisores idénticos; las variaciones en la fabricación de emisores, particularmente el conducto por el cual circula el agua dentro del gotero, afecta la presión de operación del mismo y por tanto su caudal de descarga (Goldberg, 1974; Solomon, 1979; Ben, 1984).

Para determinar el coeficiente de variación se utilizaron las ecuaciones:

$$CV = \frac{S}{\mu} * 100 \quad (15)$$

Donde CV es el coeficiente de variación del emisor (%), S es la desviación estándar que se calcula con la ecuación 9, y μ es la media aritmética.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_i - q_m)^2}{n-1}} \quad (16)$$

Donde S es la desviación estándar (adimensional), q_i es el caudal observado ($L h^{-1}$), q_m es el caudal medio ($L h^{-1}$) y n es el número de emisores.

Para determinar la variación entre el caudal medido y el calculado con las ecuaciones 2, 3, 4 y 5 se utilizó la ecuación 17.

$$dq = \frac{(q_c - q_m)}{q_c} * 100 \quad (17)$$

Donde dq es la diferencia entre el caudal calculado y el caudal medido (%); q_c es el caudal calculado ($L h^{-1}$); q_m es el caudal medido ($L h^{-1}$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto de la variación de presión y las especificaciones técnicas del fabricante

Dentro de las especificaciones técnicas del fabricante, se proporcionan los datos que describen el funcionamiento hidráulico del

gotero, éste se refiere a la relación caudal-presión, que viene dada por la ecuación del gotero.

Se calculó el caudal para cada uno de los goteros, de acuerdo con las ecuaciones 2, 3, 4 y 5 y se comparó con los caudales medidos variando la presión y variando la temperatura del agua; en la Tabla 2 se observan los datos obtenidos y en las Figuras. 3, 4, 5 y 6 se observa el comportamiento gráfico de cada uno de los goteros evaluados.

Tabla 2. Caudales medidos al variar la temperatura y presión en las líneas de goteros evaluadas.

Temperatura (°C)	Caudal de los goteros evaluados ($L h^{-1}$)											
	Streamline			Eurodrip			Siberline P1			SuperTyphoon		
	Presión evaluada (bar)											
	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00
15	0,70	0,88	1,05	0,78	1,01	1,19	0,92	1,21	1,44	1,02	1,30	1,55
30	0,71	0,88	1,02	0,86	1,07	1,25	1,03	1,29	1,50	1,06	1,36	1,54
45	0,71	0,87	1,01	0,86	1,07	1,23	0,98	1,25	1,47	1,08	1,32	1,53
60	0,75	0,90	1,03	0,87	1,08	1,24	1,04	1,29	-----	1,10	1,36	1,56

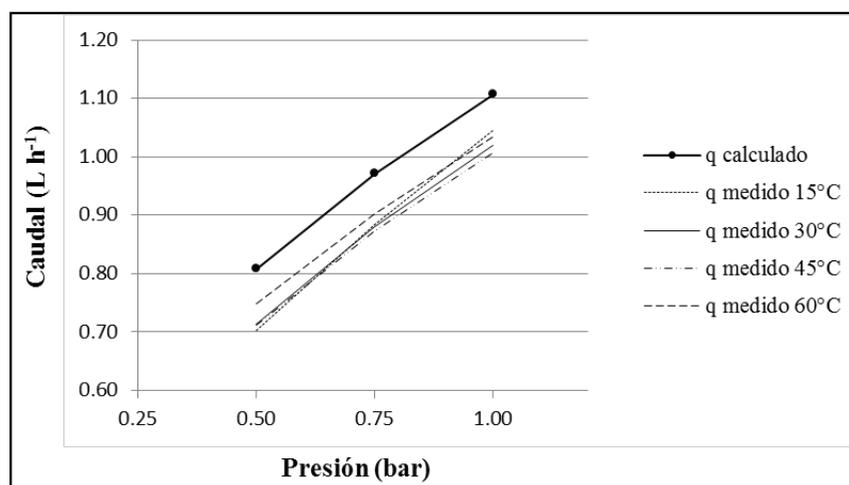


Figura 3. Caudal calculado y medido para el gotero Streamline 16060.

En los goteros Streamline 16060 y SuperThypoop 16125 (Fig. 3 y 6) se observa que el caudal calculado con la ecuación proporcionada por el fabricante, sobreestima el caudal medido con diferente temperatura del agua; en el gotero Eurodrip (Fig. 4) el caudal calculado con la ecuación del fabricante se ajusta al caudal medido cuando la temperatura del agua es de 15 °C, mientras que en gotero Siberline P1 (Fig. 5) el caudal calculado con la ecuación del fabricante se ajusta más a los datos del caudal medido

cuando la temperatura del agua es de 30°C. Peña *et al.* (1977), determinan que las diferencias entre las curvas de presión-caudal bajo condiciones de diseño y aquellas obtenidas en campo, se deben básicamente a la diferencia en las temperaturas del agua consideradas; lo anterior se debe además a la elasticidad del material con que están contruidos los goteros, los cuales se expanden cuando la temperatura se incrementa y se contraen cuando se reduce la temperatura.

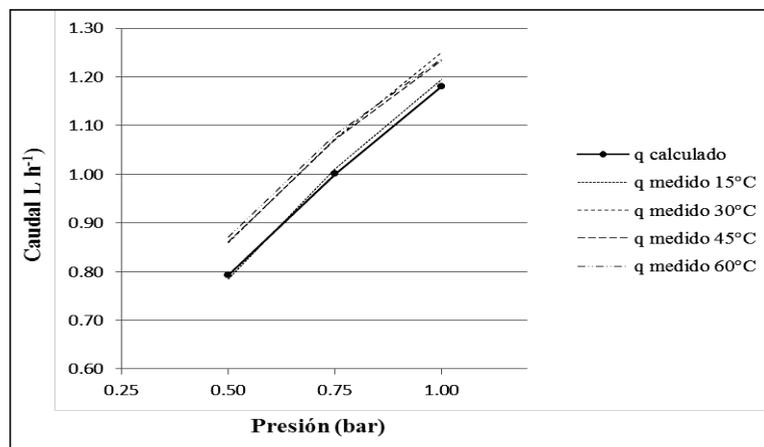


Figura 4. Caudal calculado y medido para el gotero Eurodrip.

Gil *et al.*, (2002), en una evaluación del comportamiento hidráulico de varios emisores importados para riego por goteo,

concluyeron que los cambios de presión en la tubería es una fuente importante de variación en la descarga de los goteros.

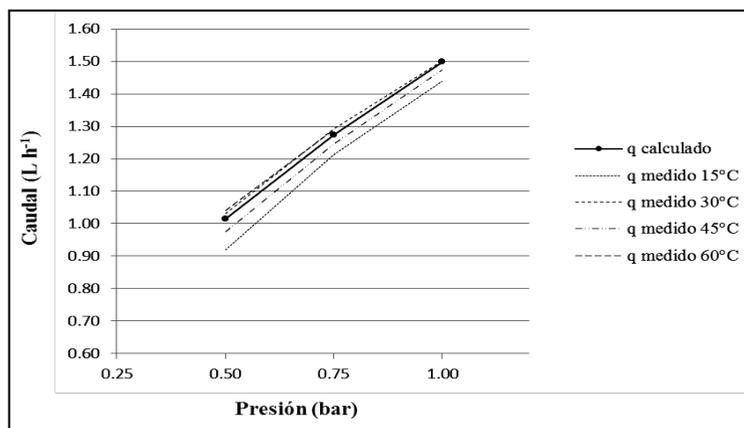


Figura 5. Caudal calculado y medido para el gotero Siberline P1.

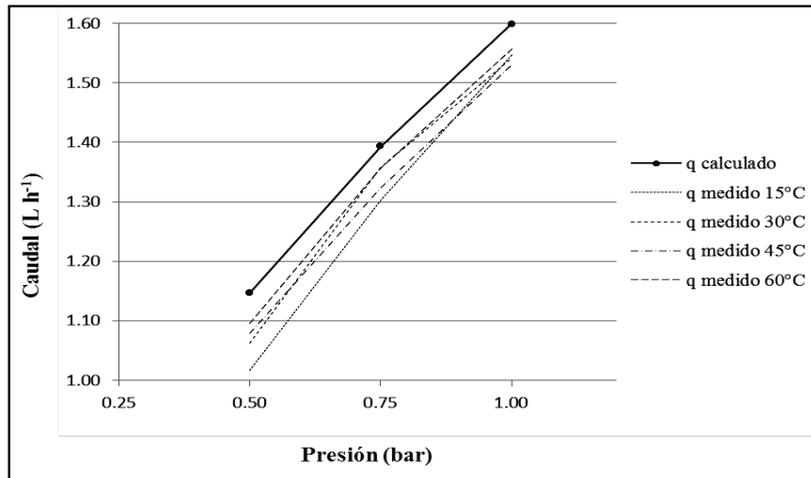


Figura 6. Caudal calculado y medido para el gotero SuperThyphoon 16125.

Efecto de la temperatura del agua sobre la descarga de los goteros

Se analizó la relación caudal-temperatura cuando se hizo variar la presión de operación en la red, los resultados se muestran en forma gráfica en las figuras 7, 8 y 9.

Como la hidráulica del gotero lo indica, a mayor presión ocurre una mayor descarga del gotero; en este caso se analiza el comportamiento de la descarga con respecto a la temperatura del agua.

En las figuras 7, 8 y 9 se observa cómo la descarga es variable al incrementar la temperatura del agua para los goteros Streamline, Siberline y SuperTyphoon; sin embargo, para el gotero Eurodrip se observa cómo el caudal se incrementó ligeramente cuando la temperatura del agua se incrementa de 15 a 30 °C, y posteriormente, la descarga del gotero se mantuvo prácticamente constante para las temperaturas 30, 45 y 60 °C.

En la figura 9, se observa que al incrementar la presión a 1 bar y la temperatura del agua a 60 °C, el gotero Siberline P1 no soportó las condiciones y se reventó, es importante mencionar que la presión de operación máxima recomendada por el fabricante para este gotero es de 0,5 bar.

Los goteros son diseñados de tal manera que su descarga depende primeramente, de la viscosidad del agua, la cual cambia con la temperatura de la misma; otro elemento que se ve afectado son las dimensiones de los conductos del agua, contrayéndolos o expandiéndolos; asimismo, considerando que el material con que se construyen los goteros es elástico, éste también es afectado por la temperatura del agua (Ben, 1984).

De acuerdo con lo anteriormente expuesto y considerando que bajo las mismas condiciones de temperatura del agua y presión en la tubería, se presentaron diferencias en el caudal entre los diferentes modelos de gotero

nos lleva a sugerir que dichas diferencias se deben principalmente a la resistencia de los materiales de fabricación y a las características de diseño de los conductos en los goteros.

Al comparar el caudal calculado con la ecuación del gotero y el caudal medido con diferentes temperaturas de agua y una presión de 0,5 bar, el gotero Siberline P1 presentó el rango de variación más grande 11,8% (entre el valor máximo y el mínimo medido); mientras que el gotero Streamline

presentó el menor rango de variación en la descarga (5,8%).

Para una presión de 0,75 bar, el gotero Eurodrip presentó el mayor rango de variación (6,9%) y el gotero Streamline presentó el menor rango de variación (3%); finalmente para una presión de 1 bar, el gotero SuperThyphoon presentó el menor rango de variación en la descarga (1,7%) y el gotero Eurodrip presentó el mayor rango de variación en el caudal con un 4,7%.

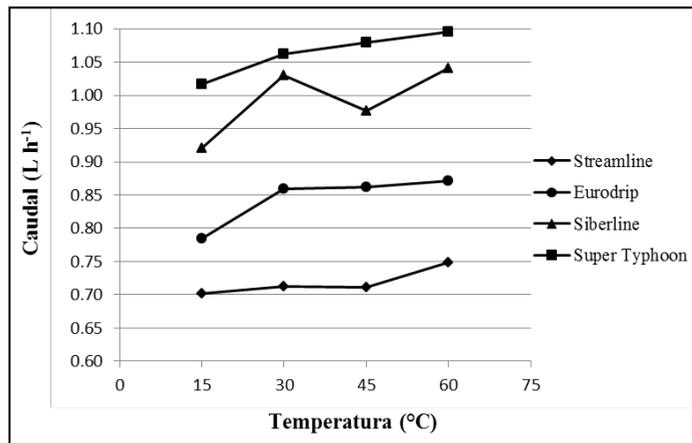


Figura 7. Variación de la descarga del gotero con respecto a la temperatura del agua para 0,5 bar de presión.

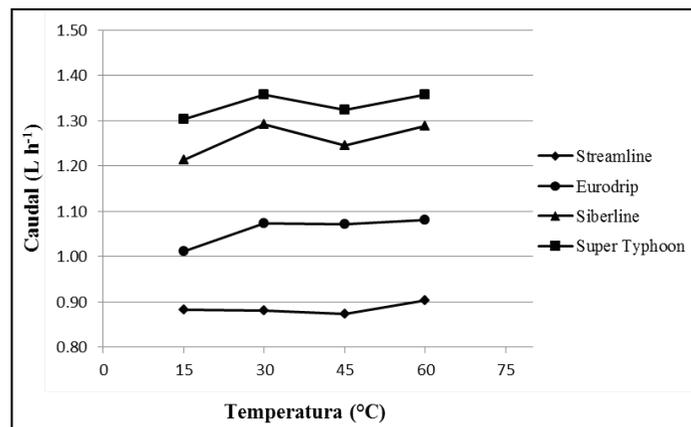


Figura 8. Variación de la descarga del gotero con respecto a la temperatura del agua para 0,75 bar de presión.

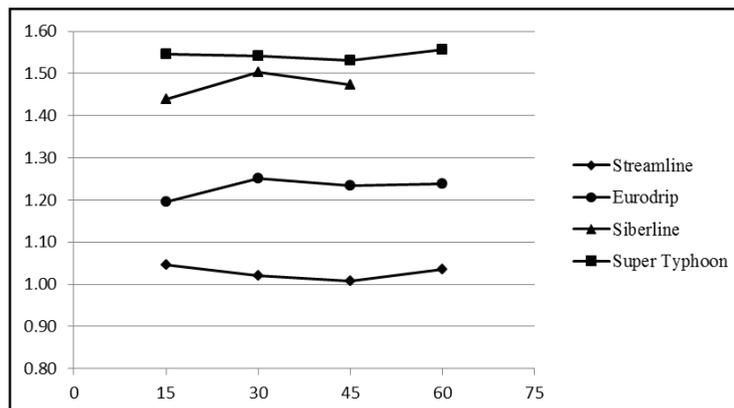


Figura 9. Variación de la descarga del gotero con respecto a la temperatura del agua para 1 bar de presión.

Análisis del Coeficiente de Uniformidad (CU)

Se determinó el CU para los cuatro goteros utilizando las ecuaciones 12, 13 y 14; con el modelo de Christiansen, el máximo valor de CU fue de 99,43% y el valor mínimo fue de 96,91%; con el modelo propuesto por Hart y Reynolds el valor máximo alcanzado fue de 99,47% y el valor mínimo fue de 97,04% mientras con el modelo propuesto por Criddle, Davis, Pair y Shockley, el valor máximo de CU fue de 99,73% y el valor mínimo de 95,24%.

En la figura. 10, se muestra el comportamiento gráfico del CU determinado con el modelo de Christiansen (ecuación 12) utilizando una presión de operación de 0,5 bar.

En la figura 10, son muy evidentes los rangos de variación en los valores de CU para los goteros Streamline, Siberline y SuperTyphoon con respecto a la temperatura del agua, mientras que el gotero Eurodrip el rango de variación del CU con respecto a la temperatura del agua fue significativamente menor.

El comportamiento de CU para las presiones de operación de 0,75 y 1 bar fue similar al mostrado en la Figura 10, lo mismo que el comportamiento de CU determinado con los otros dos modelos.

Veliz *et al.*, (2007), al realizar una evaluación hidráulica de algunos modelos de goteros comerciales, determinaron que el CU calculado con el modelo de Christiansen es superior al 96%, en este caso, las variaciones de caudal se debieron únicamente a variaciones de presión en la tubería.

Análisis del Coeficiente de Variación (CV)

Se determinó el CV para los cuatro goteros evaluados utilizando las ecuaciones 15 y 16.

En la figura 11. se muestra el comportamiento gráfico del CV con respecto a la temperatura del agua para una presión de operación de 0,5 bar.

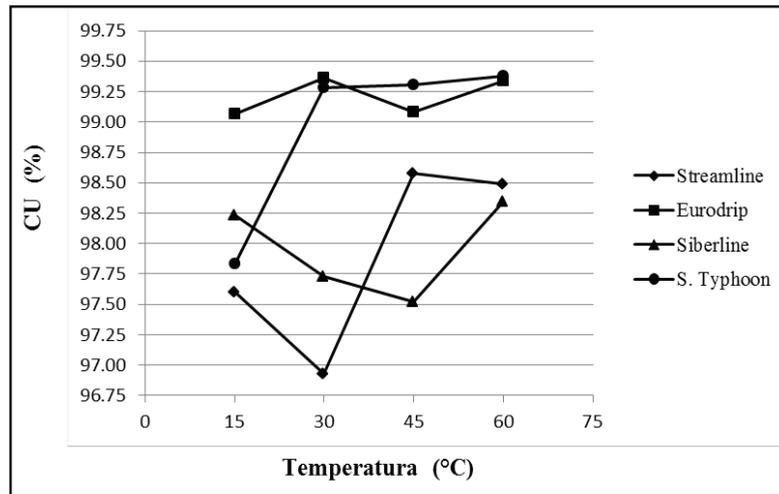


Figura 10. Comportamiento del Coeficiente de Uniformidad con respecto a la temperatura del agua.

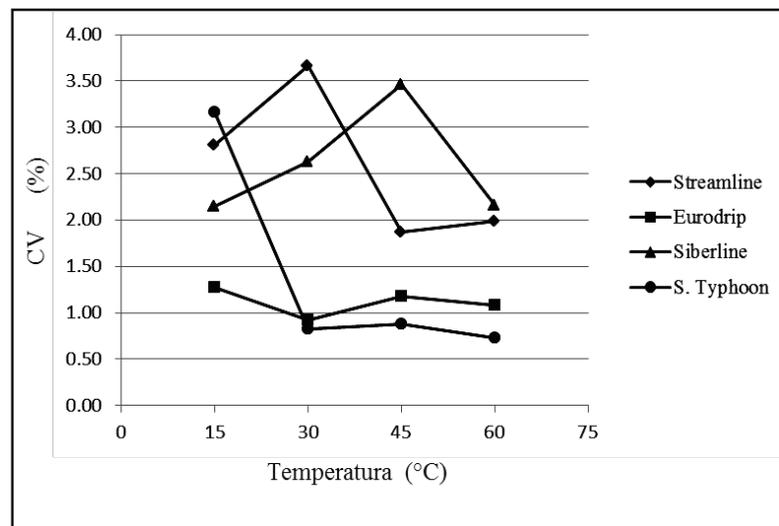


Figura 11. Comportamiento del Coeficiente de Variación con respecto a la temperatura del agua.

La figura 11, señala que es evidente el rango de variación del CV con respecto a la temperatura del agua para los goteros Streamline, Siberline y SuperTyphoon, mientras que para el gotero Eurodrip dicho rango de variación es mucho menor.

De acuerdo con Maroufpoor *et al.* (2010), las variaciones en el coeficiente de uniformidad

y de variación se deben, entre otros, a factores constructivos y a variaciones en la temperatura del agua, señalando que las altas temperaturas ejercen un probable efecto en la descarga de los goteros; el valor mínimo y máximo en las variaciones de la descarga en los goteros (ecuación 17), va desde un 0,2% para el gotero Siberline P1 trabajando a una presión de 1 bar y una temperatura

del agua de 30 °C, hasta 13,2% en el gotero Streamline trabajando a una presión de 0,5 bar y una temperatura del agua de 15 °C, respectivamente. Cuando la Norma Mexicana NMX-O-082-SCFI-2001 establece que la diferencia entre caudales no debe ser superior ni menor del 5%.

CONCLUSIONES

Los cuatro goteros evaluados tienen un CU superior al 95%, sin importar la presión de operación y la temperatura del agua, tal como lo recomienda (Pizarro, 1996), quien establece que para riego localizado de alta frecuencia el CU debe ser superior al 90%.

Todos los goteros se clasifican como excelentes respecto a su coeficiente de variación, ya que los valores son inferiores a 4%. El gotero que presentó un mayor CV fue el Streamline, mientras que el gotero SuperTyphoon presentó un menor valor de CV. Es importante destacar que este gotero está diseñado para trabajar con una presión máxima de operación mucho mayor que los otros tres; considerando lo anterior, y comparando únicamente los goteros en igualdad de condiciones de caudal y presión (Streamline, Siberline P1 y Eurodrip), el gotero que presentó un CV menor fue el Eurodrip, así como una mayor estabilidad respecto a los cambios de la temperatura del agua.

Finalmente es posible concluir que al evaluar las diferencias en la descarga entre el caudal de diseño del fabricante (caudal calculado) y el caudal medido en el experimento, sí se observa un efecto de la temperatura del agua en la descarga de los goteros, aunque la variación de la temperatura del agua no afectó los coeficientes de uniformidad y variación.

La variación en la temperatura del agua tuvo un mayor efecto en la descarga de los goteros cuando se trabajó con presión 0,5 bar, sin embargo, al incrementar la presión de operación de los goteros a 1 bar, el efecto de la temperatura del agua sobre la descarga se vio reducido.

BIBLIOGRAFÍA

BEN, N. H. 1984. Temperature and sediment effects on the hydraulics of drip irrigation lines. Tesis Doctoral. Department of soils, water and engineering, The University of Arizona. USA. 236 p.

CONAGUA. 2010. Estadísticas del Agua en México, edición 2010. Editor SEMARNAT. México. 249 p.

CONAGUA. 2011a. Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego, Año Agrícola 2009 -2010. Editor SEMARNAT. México. 317 p.

CONAGUA. 2011b. Estadísticas del Agua en México, edición 2011. Editor SEMARNAT. México. 181 p.

CUN, G.R., PUIG, E.O., MORALES, G.C. y DUARTE, D.C. 2011. Evaluación de la uniformidad del riego por goteo en condiciones de casas de cultivo en explotación. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. 20(1):36 - 39.

EURODRIP. 2012. Cinta de riego por goteo sin costura. En: <http://www.eurodripusa.com/sites/eurodripusa.com/files/productsheet-sdt-es.pdf>.6p.; consulta: noviembre, 2012.

GARCÍA, C. O. 2010. Apertura económica, el TLCAN y la expansión del sector agrícola de hortalizas en el Estado de Sinaloa; Tesis de Maestría en economía aplicada; El Colegio de la Frontera Norte; México. 66 p.

GIL, J.A., KHAN, L. y HERNÁNDEZ, R. 2002. Evaluación del comportamiento hidráulico de

- varios emisores importados para riego por goteo. *Revista Científica UDO Agrícola*. Universidad de Oriente Press. 2(1):64 - 72.
- GOLDBERG, S. D. 1974. Conceptos modernos sobre irrigación. Departamento de Irrigación, Universidad Hebrea. TahalConsultingEngineers Ltd. Editado por el Departamento de Capacitación por el Extranjero. Ministerio de Agricultura. Israel.19 p.
- IRRITEC. 2012. P1 Cinta de riego. En: <http://www.irritec.it/mx/P1.pdf>.1 p.; Consulta: noviembre, 2012.
- JAIMEZ, R.E., MARTÍNEZ, P.J. y DA SILVA, R. 2009. Microclima en invernaderos: sus efectos sobre intercambio de gases en cultivos, casos de Venezuela; Informe Final de Proyecto "Balances Térmicos, Calidad de sustratos, y filmes plásticos: sus efectos sobre el comportamiento de cultivos en los invernaderos construidos en Venezuela". Venezuela. 102 p.
- KELLER, J. 1980. Trickle irrigation.S.C.A. National Engineering Handbook.Section 15.Irrigation.79 p.
- MAROUFPOOR, E., FARYABI, A., GHAMARNIA, H. y MOSHREFI, G.Y. 2010. Evaluation of Uniformity Coefficients for sprinkler irrigation systems under different field conditions in Kurdistan Province (Northwest of Iran). *Soil&WaterResources*. 5(4):139 - 145.
- MONTILLA, R.E., JAIMEZ, R.E. y RUJANO, M.J.R. 2009.Microclima en invernaderos: formulación y validación de un modelo matemático para simular los procesos térmicos en un invernadero; Informe Final de Proyecto "Balances Térmicos, Calidad de sustratos, y filmes plásticos: sus efectos sobre el comportamiento de cultivos en los invernaderos construidos en Venezuela". Venezuela. 102 p.
- NETAFIM. 2012a. Streamline 16060. En: <http://www.netafim.com/Data/Uploads/Streamline16060%20SP.pdf>. 2 p.; consulta: noviembre, 2012.
- NETAFIM. 2012b. SuperThyphoon 16125. En: <http://www.netafim.com/Data/Uploads/S.Typhoon%2016125%20low%20SP.pdf>. 2 p.; consulta: noviembre, 2012.
- PEÑA, P.E., ESCOBAR, A. M. A. y MORENO, D. L. 1977. Estudio del funcionamiento hidráulico de goteros. II Seminario Latinoamericano sobre riego por goteo. S.A.R.H. México, I.I.C.A. Buenos Aires, O.E.A. 97 p.
- PIZARRO, F. 1996. Riegos localizados de alta frecuencia. Tercera edición. Ediciones Mundi-Prensa. España. 511 p.
- SECRETARÍA DE ECONOMÍA. (SE). 2001. NMX-O-082-SCFI-2001, Norma Mexicana para la regulación de "Goteros para sistemas de riego - Especificaciones y métodos de prueba"; Catálogo de Normas Mexicanas de la Secretaría de Economía. En: <http://200.77.231.100/work/normas/nmx/2001/nmx-o-082-scfi-2001.pdf>; 20 p.; consulta: noviembre, 2012.
- SOLOMON, K.H. 1979. Variability of sprinkler coefficient of uniformity test results. *Trans ASAE*. 22(5): 1078 - 1086.
- UNLAND, W.H.E.K. y ANGELES, H.J.M. 2011. Comparación de parámetros meteorológicos dentro y fuera de un invernadero para el cálculo de los requerimientos hídricos de un cultivo bajo condiciones de invernadero en Ocuituco, Morelos. Memoria del XX Congreso Nacional y V Congreso Internacional sobre Meteorología; México.<http://www.ommac.org/congreso2011/document/extenso/Ext2011031.pdf>.9 p; consulta: noviembre, 2012.
- VELIZ, T. R., MUJICA, C. A. y PÉREZ, D. W. 2007. Evaluación hidráulica de algunos modelos de goteros comerciales. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 16(4):74 - 78.