



<https://eqrcode.co/a/YOUtT4>

ORIGINAL ARTICLE | ARTÍCULO ORIGINAL

# Hydraulic Hysteresis in Self-Compensating Emitters

## *Histéresis hidráulica en emisores autocompensantes*

Dr.C. Dayma Carmenates-Hernández<sup>\*</sup>, Dr.C. Maiquel López-Silva<sup>†</sup>, Dr.C. Albi Mujica-Cervantes<sup>‡</sup>,  
Dr.C. Pedro Paneque-Rondón<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> Universidad Católica Sedes Sapientiae (UCSS), Facultad de Ingeniería, Lima, Perú.

<sup>‡</sup> Universidad de Ciego de Ávila, Centro de Estudios Hidrotécnicos, Ciego de Ávila, Cuba,

<sup>‡</sup> Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, Centro de Mecanización Agropecuaria, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

**RESUMEN.** El presente trabajo se realizó con el objetivo de evaluar el fenómeno de histéresis hidráulica en emisores y cintas de riego autocompensantes. Los modelos de emisores evaluados fueron el Vip Line con caudal nominal de 3.9 L/h, el Naan PC con caudal nominal de 4 L/h y la Cinta de riego Aqua Traxx. Se realizó la determinación de la curva caudal – presión midiendo el fenómeno de histéresis en sentido retroverso. El elastómero en los emisores autocompensante influye en la presencia del fenómeno de la histéresis hidráulica, además resultan afectados por el fenómeno de la histéresis del material, aspecto este que se observa en la diferencia de las curvas  $q = f(h)$  registradas con presiones ascendentes y descendentes y cuyas ecuaciones son del tipo polinómicas obtenidas en condiciones experimentales con coeficientes de relación superiores al 90%.

**Palabras clave:** presión, caudal, elastómero, curvas, ecuaciones.

**ABSTRACT.** This work was carried out at “Ceballos” Citrus Company with the objective of evaluating the phenomenon of hydraulic hysteresis in emitters and self-compensating irrigation tapes. The emitter models Vip Line with a nominal flow of 3.9 L/h and Naan PC with a nominal flow of 4 L/h were evaluated as well as the Aqua Traxx Irrigation Tape. The determination of the flow-pressure curve was performed by measuring the hysteresis phenomenon in the backward direction. These self-compensating emitters are affected by the phenomenon of hysteresis of the material, an aspect that is observed in the difference of the curves  $q = f(h)$  registered with ascending and descending pressures and whose equations are of the polynomial type obtained in experimental conditions with coefficients of relation higher than 90%.

**Keywords:** pressure, flow, elastomer, curves, equations.

## INTRODUCTION

In localized irrigation, the uniformity of water application along the lateral line is closely related to the variation of pressure in the emitters. This variation is caused by the loss of load along the pipe and the insertions of the emitters, the losses of position energy, the quality of the water in the pipe, the seals and the effects of water temperature on the exit regime and orifice of the emitter Gomes *et al.* (2013).

In the sizing of microirrigation systems, the variability between emitters due to the manufacturing process must be

## INTRODUCCIÓN

En el riego localizado, la uniformidad de aplicación de agua a lo largo de la línea lateral está íntimamente relacionada a la variación de presión en los emisores, esta variación es originada por las pérdidas de carga a lo largo de la tubería y de las inserciones de los emisores, las pérdidas de energía de posición, la calidad del agua en la tubería, las obturaciones y los efectos de temperatura del agua sobre el régimen de salida y orificio del emisor Gomes *et al.* (2013).

En el dimensionamiento de sistemas de microirrigación se debe considerar la variabilidad existente entre emisores como

\*Author for correspondence: Dayma Carmenates Hernández, e-mail: daymasadami@yahoo.com

Received: 17/11/2019.

Approved: 14/06/2020.

considered. Another important point is that the system may present disturbances of variation over time depending on the quality of the water and the management of the irrigation system used (Coelho, 2007).

Pizarro (1990) states that, for any type of emitter, between the emitted flow rate and the service pressure, there is the relationship called the emitter equation  $q = Kd(h)^x$  which describes the hydraulic behavior of the emitters.

The self-compensating emitters have an elastic membrane with and without a hole that contracts or expands according to the pressure that acts, to allow a constant flow rate to pass through a range of inlet pressures and that is why they present the hysteresis phenomenon in their operation (Vélez *et al.*, 2013). In addition, they state that the self-compensating emitters present the phenomenon of hysteresis in their operation, which is characteristic of any mechanism that uses elastic elements.

Physically, hysteresis is the tendency of a material to retain one of its properties with respect to the stimulus that has generated it (Pizarro, 1987 and Hernández, 1987). This concept applied to a self-compensating emitter with the presence of an elastomer, allows understanding that, under the variations of pressures that occur in these emitters in the microirrigation system in operating conditions, the flow - pressure curve will behave differently upwards and downward pressure, because the emitter responds differently when the pressure increases and when it drops.

On emitters, there are not enough reports of scientific papers that explain this type of phenomenon, although it is supposed that, physically it is a phenomenon that has a different behavior, though close, in both directions. Therefore, the objective of this work is to evaluate the phenomenon of hydraulic hysteresis in emitters and self-compensating irrigation tapes.

## MATERIALS AND METHODS

The research was carried out at the University of Ciego de Ávila and in areas of "Ceballos" Agroindustrial Company. For the evaluation of the models of self-compensating emitters Vip Line and the Naan PC, the methodology of Pizarro (1996) was used and for the case of the compensating Aqua Traxx irrigation tape the methodology used was based mainly on the recommendations specified in the Mexican standard (IMTA. MX, 2003).

### Determination of the hydraulic hysteresis and flow-pressure curves ( $q = f(h)$ )

For the determination of the curve  $q = f(h)$ , the aspects indicated in the Standard ISO.9260: 91 (1991) were taken into account. Irrigation equipment for Agriculture Drippers Specifications and test methods. Then, 4 flow measurements were taken for each dropper in this series (numbers 3, 12, 13, 23) randomly selected according to Pizarro (1990) and the variation of the emission rate was determined based on the inlet pressure. Each emitter was tested in stages and with

consecuencia del proceso de fabricación. Otro punto importante es que el sistema puede presentar disturbios de variación a lo largo del tiempo en función de la calidad del agua y del manejo del sistema de riego utilizado (Coelho, 2007).

Pizarro (1990), plantea que, para cualquier tipo de emisor, entre el caudal emitido y la presión de servicio, existe la relación denominada ecuación del emisor:  $q=Kd(h)^x$  la cual describe el comportamiento hidráulico de los emisores.

Los emisores autocompensantes disponen de una membrana elástica con y sin orificio que se contrae o se dilata de acuerdo con la presión que actúa, para dejar pasar un caudal constante dentro de un rango de presiones de entrada y es por ello que presentan en su funcionamiento el fenómeno de la histéresis (Vélez *et al.*, 2013). Además, plantean que los emisores autocompensante presentan en su funcionamiento el fenómeno de la histéresis que lleva consigo cualquier mecanismo que utilice elementos elásticos.

Físicamente, la histéresis es la tendencia de un material a conservar una de sus propiedades respecto al estímulo que lo ha generado Pizarro (1987) y (Hernández, 1987). Este concepto aplicado a un emisor atocompensante con presencia de (elastómero), permite entender que bajo las variaciones de presiones que se producen en estos emisores en el sistema de microirrigación en condiciones de explotación, la curva caudal – presión tendrá un comportamiento diferente en sentido ascendente y descendente de las presiones, porque el emisor responde de manera diferente al incrementar la presión respecto a cuando la misma desciende.

En los emisores no se reportan suficientes trabajos científicos que expliquen este tipo de fenómeno, aunque se supone que físicamente se trata de un fenómeno que tiene un comportamiento diferente, aunque cercano en ambas direcciones, por lo que el objetivo de este trabajo es evaluar el fenómeno de histéresis hidráulica en emisores y cintas de riego autocompensante.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en la Universidad de Ciego de Ávila y en áreas de la Empresa Agroindustrial de Ceballos. Para la evaluación de los modelos de emisores autocompensante Vip Line y el Naan PC se utilizó la metodología de Pizarro (1996) y para el caso de la cinta de riego Aqua Traxx compensante la metodología utilizada se basó fundamentalmente en las recomendaciones especificadas en la norma mexicana (IMTA. MX, 2003).

### Determinación de las curvas histéresis hidráulica y caudal-presión ( $q=f(h)$ )

Para la determinación de la curva  $q=f(h)$  se tuvo en cuenta los aspectos señalados en la por la Norma ISO.9260: 91 (1991). Equipos de riego para la Agricultura Goteros Especificaciones y métodos de prueba. Luego se tomaron 4 mediciones de caudal para cada gotero de esta serie (los números 3, 12, 13, 23) seleccionados al azar según Pizarro (1990) y se les determinó la variación del caudal de emisión en función de la presión de entrada. Se probó cada emisor por etapas y con presiones no mayores a 50 kPa desde la presión cero hasta 1,2 veces la presión máxima (Pmax). Los emisores regulados fueron probados a distintas presiones dentro del rango de regulación. La lectura

pressures not exceeding 50 kPa from zero pressure to 1.2 times the maximum pressure ( $P_{max}$ ). Regulated emitters were tested at different pressures within the regulation range. The reading of the results was taken during 3 minutes after reaching the test pressure.

In the case of self-compensated emitters, in addition to taking the flow rates corresponding to rising pressure points, once the maximum pressure within its working range was reached, the test was carried out in a downward direction of pressures, in order to assess the phenomenon of hysteresis due to the elastomer.

In the case of the self-compensating Aqua Traxx irrigation tape, 25% of the emitters of the sample obtained were randomly taken, identifying each of them. As in the evaluation of dropper type emitters, those selected on the belt were tested at different pressures within a range from 0 to 1.2 times the maximum pressure ( $P_{max}$ ). The self-compensating emitters were operated within the amplitude of regulation, increasing or decreasing the inlet pressure and the curve was constructed ( $q = f(h)$ ).

## RESULTS AND DISCUSSION

Figure 1 shows the behavior of the hydraulic hysteresis ( $qh$ ) and pressure flow ( $q$ ) curves. As it can be seen, the behavior for both cases seems similar; however, it is very different, obtaining a second-degree polynomial with coefficients of ratio above 90% for both cases. In this case, the hysteresis or recoil curve is a characteristic process of the self-compensating emitters, due to an elastic membrane of silicone material that is inside this type of emitter called elastomer. Hysteresis is the tendency of a material to retain one of its properties with respect to the stimulus that has generated it (Hernández, 1987).

In addition, the pressure flow ratio of the Vip Line transmitter with self-compensating flow, nominal flow of 3.9 L/h and a compensation range between (68-413 kPa), which responds to two equations obtained in experimental conditions of polynomial type, an ascending and another descending one. The latter equation, as the emitter is self-compensating, is affected by the phenomenon of the hysteresis of the material, an aspect that can be observed in the difference of the flow-pressure curves, registered with ascending and descending pressures.

It is necessary to emphasize that the relationship between the flow rate and the pressure was typical of the condition of self-compensation of this type of emitters. The parallel tendency of the curve  $q = f(h)$  with respect to the axis of the pressures can be observed specifically in the interval between 75 kPa and 375 kPa, indicating that the self-compensation behavior of the flow with respect to the applied pressure manifested a relationship satisfactory with a coefficient of determination of 94% ( $R^2 = 0.9482$ ).

These results coincide with those obtained by Bliesner (1990, 2006), Boman (2002), Gil *et al.* (2002) and Armonis (2006) with other emitter models, where they evaluate compensating and non-compensating drippers and determine the flow rate for each model evaluated, only for the pressure flow curve. These authors did not evaluate the hysteresis phenomenon in these emitters.

de los resultados se tomó durante 3 minutos después de alcanzar la presión de prueba.

Para el caso de los emisores autocompensados además de tomar los caudales correspondientes a puntos ascendentes de presiones, una vez que alcanzó la presión máxima dentro de su intervalo de trabajo, se le efectuó el ensayo en sentido descendente de presiones, con vista a evaluar el fenómeno de histéresis que se debe al elastómero.

Para el caso de la cinta de riego aqua traxx autocompensante se tomó al azar el 25% de los emisores de la muestra obtenida, identificándose cada uno de ellos. Al igual que en la evaluación de los emisores tipo goteros, los seleccionados en la cinta, se probaron a diferentes presiones dentro de un intervalo comprendido de 0 hasta 1,2 veces la presión máxima ( $p_{máx.}$ ), los emisores autocompensante se operaron dentro de la amplitud de regulación, aumentando o disminuyendo la presión de entrada y se construyó la curva ( $q = f(h)$ ).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1 se observa el comportamiento de las curvas histéresis hidráulicas ( $qh$ ) y caudal presión ( $q$ ), podemos ver que el comportamiento para ambos casos parece similar, sin embargo, es totalmente diferente, obteniéndose un polinomio de segundo grado con coeficientes de relación por encima del 90% para ambos casos. En este caso la curva de histéresis o de retroceso es un proceso característico de los emisores autocompensante, debido a una membrana elástica de material de silicona que tienen en su interior este tipo de emisor denominada, elastómero. La histéresis es la tendencia de un material a conservar una de sus propiedades respecto al estímulo que lo ha generado (Hernández, 1987).

Además se presenta la relación caudal presión del emisor Vip Line con flujo autocompensante, caudal nominal de 3.9 L/h y un rango de compensación entre (68-413 kPa), el cual responde a dos ecuaciones obtenidas en condiciones experimentales de tipo polinómicas una ascendente y otra descendente, esta última por ser autocompensado el emisor, resulta afectado por el fenómeno de la histéresis del material, aspecto que puede observarse en la diferencia de las curvas caudal-presión, registradas con presiones ascendentes y descendentes.

Es necesario destacar, que la relación entre el caudal y la presión resultó típico de la condición de autocompensación propia de los emisores de este tipo. Puede observarse la tendencia al paralelismo de la curva  $q = f(h)$  respecto al eje de las presiones específicamente en el intervalo comprendido entre 75 kPa y 375 kPa, indicando que el comportamiento de autocompensación del caudal con respecto a la presión aplicada manifestó una relación satisfactoria con un coeficiente de determinación del 94% ( $R^2 = 0,9482$ ).

Estos resultados coinciden con los obtenidos por Bliesner (1990, 2006); Boman (2002); Gil *et al.* (2002); Armonis (2006) con otros modelos de emisores, donde evalúan goteros compensantes y no compensantes determinando el régimen de flujo para cada modelo evaluado, solo para la curva caudal presión. Estos autores no evaluaron el fenómeno de histéresis en estos emisores.

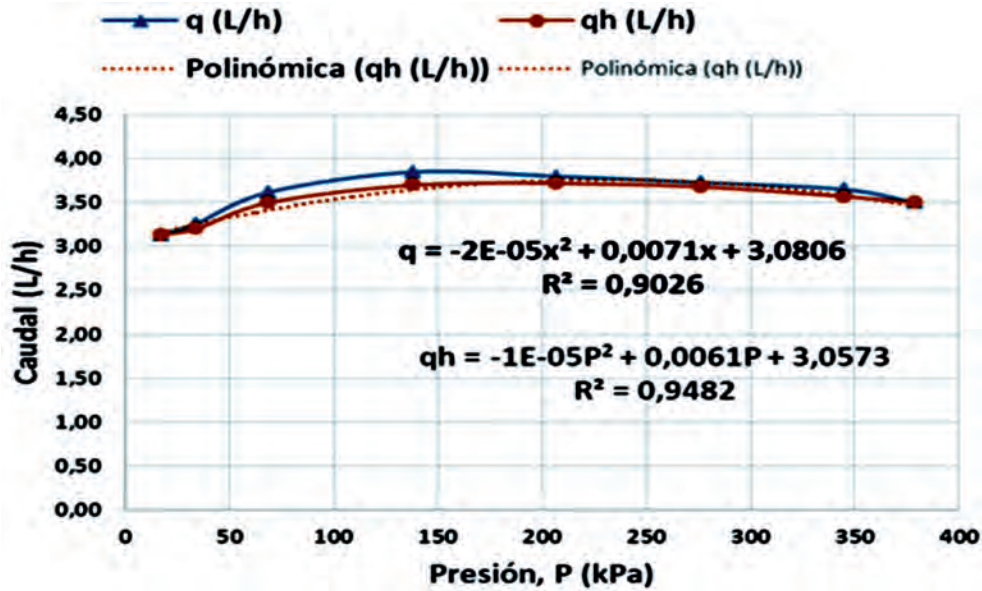


FIGURE 1. Hydraulic hysteresis and flow ratio - pressure of the self-compensating Vip Line dropper nominal flow of 3.9 L/h.  
 FIGURA 1. Relación histéresis hidráulica y caudal - presión del gotero Vip Line autocompensante caudal nominal de 3.9 L/h.

Figure 2 shows the results obtained in the hydraulic hysteresis and pressure flow ratio ( $q = f(h)$ ) of the Naan PC dripper, with a nominal flow of 4 L / h and a compensation range of 68-475 kPa.

In a self-compensating emitter, the presence of the elastomer allows understanding that under the variations of pressures that occur in a microirrigation system in operating conditions, the flow-pressure curve will have a different behavior in an upward and downward direction of the pressures, because the emitter responds differently by increasing the pressure with respect to when it drops. As it can be seen in the figure, the hydraulic hysteresis and pressure flow curves are different in the ascending and descending state of the flow. In addition, the correlation coefficients obtained were  $q_h$ : 0.91% and  $q$ : 0.92%, which evidences a good adjustment in the equations of second grade and that coincides with that obtained by Talamini *et al.* (2018), but in other models of self-compensating emitters.

Due to the behavior of the curve  $q = f(q)$  obtained, it is inferred that the flow responds to the service pressures following a certain compensation trend according to the value obtained of 91% determination coefficient.  $R^2 = 0.910$ .

However, it is evident that the flow increases in a very low proportion with respect to the increase in pressure. That demonstrates the high compensation of this dripper, which is evidenced by the fact that at 100 kPa the flow reached 4.2 L / h and at 275 kPa the flow rate was 4.0 L/h, with a high compensation capacity in this model.

As this emitter is self-compensating is also affected by the phenomenon of hysteresis of the material, an aspect that is observed in the difference of the curves  $q = f(h)$  registered with ascending and descending pressures and whose equations are of the polynomial type obtained under experimental conditions. These results coincide with those obtained by Ribeiro *et al.* (2014).

En la Figura 2 se muestran los resultados obtenidos en la relación histéresis hidráulica y caudal presión ( $q = f(h)$ ) del gotero Naan PC, con un caudal nominal de 4 L/h y un rango de compensación de 68-475 kPa.

En un emisor autocompensante la presencia del elastómero permite entender que bajo las variaciones de presiones que se producen en un sistema de microirrigación en condiciones de explotación, la curva caudal-presión tendrá un comportamiento diferente en sentido ascendente y descendente de las presiones, porque el emisor responde de manera diferente al incrementar la presión respecto a cuando la misma descende. Como se puede observar en la figura las curvas histéresis hidráulicas y caudal presión son diferentes en estado ascendente y descendente del caudal, además los coeficientes de correlación obtenidos para  $q_h$ : 0.91% y  $q$ : 0.92%, lo que evidencia un buen ajuste en las ecuaciones de segundo grado., coincidiendo con lo obtenido por Talamini *et al.* (2018), pero en otros modelos de emisores autocompensantes.

Por el comportamiento de la curva  $q = f(q)$  obtenida se infiere que el caudal responde a las presiones de servicio siguiendo determinada tendencia de compensación de acuerdo al valor obtenido del coeficiente de determinación del 91%.  $R^2 = 0.910$ .

Sin embargo, se evidencia que el caudal aumenta en una proporción muy baja respecto al incremento de la presión, demostrando así, la alta compensación de este gotero, lo cual se evidencia por el hecho de que a 100 kPa el caudal alcanzó los 4,2 L/h y a 275 kPa el caudal resultó de 4,0 L/h existiendo una alta capacidad de compensación en este modelo.

Este emisor por ser autocompensante resulta también afectado por el fenómeno de la histéresis del material, aspecto este que se observa en la diferencia de las curvas  $q = f(h)$  registradas con presiones ascendentes y descendentes y cuyas ecuaciones son del tipo polinómicas obtenidas en condiciones experimentales. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Ribeiro *et al.* (2014).



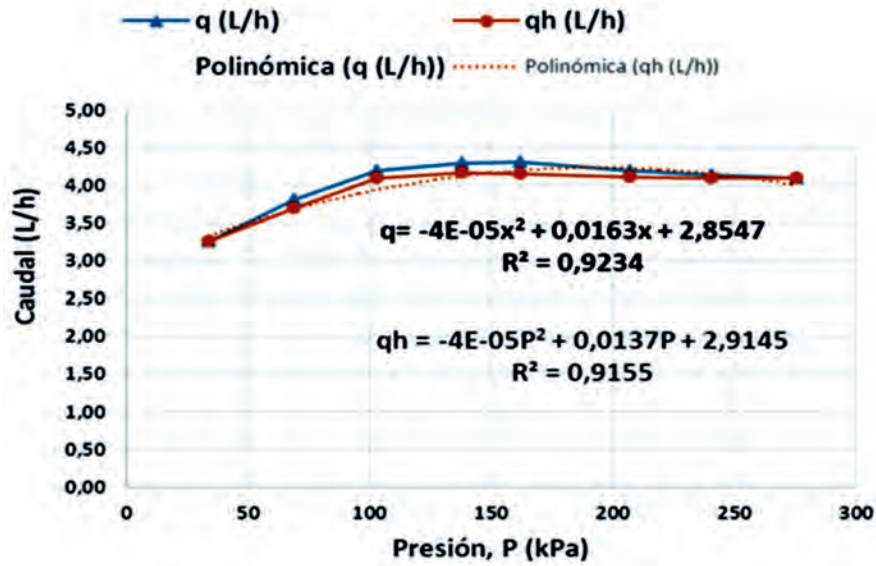


FIGURE 2. Hydraulic hysteresis and flow-pressure ratio of the Naan PC dropper model with a nominal flow rate of 4 L/h  
 FIGURA 2. Relación histeresis hidráulica y caudal-presión del gotero Naan PC modelo autocompensante con caudal nominal de 4 L/h..

Figure 3 shows the hydraulic hysteresis and flow-pressure relationship of the self-compensating Aqua Traxx belt, which has a nominal flow of 1,021 L/h and a compensation range of 68,966 - 172,416 kPa. In the figure, there is a strong relationship between flow and pressure, which is evidenced by the coefficient of determination obtained, which reached a value of 0.9969 for the case of (qh). It can be pointed out that the variations obtained in the flow rates when the pressure varies, vary from the parameters given by the manufacturer according to the nominal flow of this model. These results coincide with those obtained by Cunha *et al.* (2008), but in this case, the author obtained R<sup>2</sup> lower than those described in this work for other types of self-compensating emitters. In addition, the behavior of the Aqua Traxx irrigation tape can be seen, in which the best fit of the second-degree polynomial equation was achieved, reaching a ratio coefficient of qh: 0.99%. This coincides with that obtained by Carmenates *et al.* (2019).

En la Figura 3 se presenta la relación histeresis hidráulica y caudal- presión de la cinta Aqua Traxx modelo autocompensante, la que tiene un caudal nominal de 1,021 L/h y un rango de compensación de 68,966–172,416 kPa. En la figura existe una fuerte relación entre el caudal y la presión, lo que se evidencia con el coeficiente de determinación obtenido, alcanzó un valor de 0,9969 para el caso de (qh). Podemos señalar que las variaciones obtenidas en los caudales al variar la presión se alejan de los parámetros dados por el fabricante según el caudal nominal de este modelo. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Cunha *et al.* (2008), pero es este caso al autor obtuvo R<sup>2</sup> inferiores a los descritos en este trabajo para otros tipos de emisores autocompensantes. Además, se puede apreciar el comportamiento de la cinta de riego aqua traxx, en el cual se alcanzó el mejor ajuste del polinomio de segundo grado, alcanzando un coeficiente de relación del qh: 0.99%. Esto coincide con lo obtenido por Carmenates *et al.* (2019).

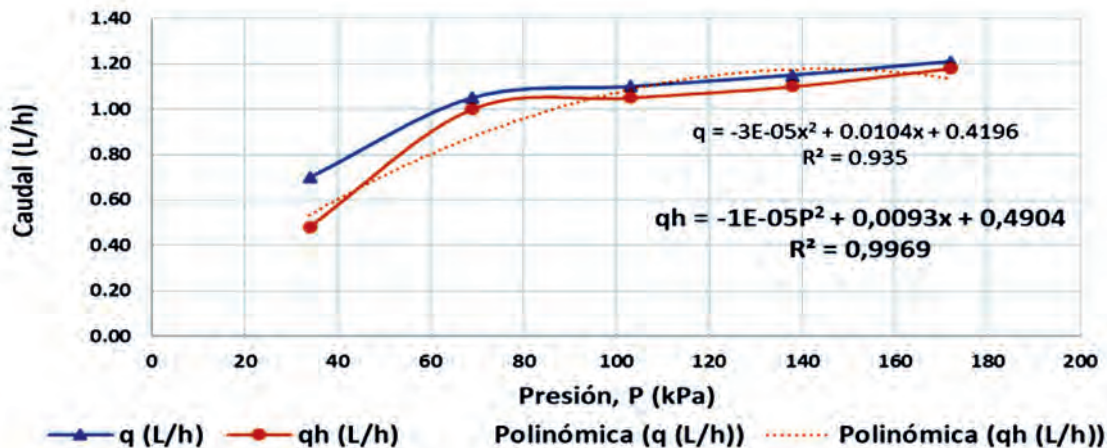


FIGURE 3. Hydraulic hysteresis ratio and flow-pressure of the belt or drip pipe Aqua Traxx Self-compensating, nominal flow of 1,021 L/h.  
 FIGURA 3. Relación histeresis hidráulica y caudal-presión de la cinta o tubería de goteo Aqua Traxx Autocompensante, caudal nominal de 1,021L/h.

Coinciding with Casado & Sirgado (2015) the phenomenon of hydraulic hysteresis has been little studied, however, the manifestation of the phenomenon in the ascent and descent phases can be affirmed. Ascent phase: for the water with surface tension ( $\sigma$ ) to start to flow out of the hole of an emitter of diameter ( $d$ ) in contact with the atmosphere. It is necessary that the pressure ( $P$ ) in the pipe is greater than ( $4\sigma/d$ ) in order to overcome the overpressure exerted by the surface tension ( $\sigma$ ) due to the formation of a convex meniscus of diameter at the outlet of the hole as it is shown in Equation 1.

$$P > \frac{4\sigma}{d} \quad (1)$$

This expression indicates that in an emitter of diameter  $d$ , water begins to flow out of the hole when the pressure  $P$  is greater than four times the surface tension ( $\sigma$ ) of the water divided by  $d$ , because a convex meniscus is formed that exerts an overpressure on the emitter. With a pressure  $P$ , only emitters having a diameter larger than the minimum required diameter ( $d_{\min}$ ), that is calculated as shown in Equation 2, can be discharged.

$$d > \frac{4\sigma}{P_{\min}} \quad (2)$$

After the value of this overpressure is exceeded, a film of water forms around the pipe that eliminates the meniscus and the emitters work normally.

Descent phase: the descent phase is different since it is not necessary to overcome the meniscus overpressure. This behavior is related to the reduction of the curvature of the drops when leaving the emitter, because the pipe is totally surrounded by a film of water that considerably diminishes the effects of the meniscus overpressure (Casado & Sirgado, 2015).

## CONCLUSIONS

- In the relationship of the hydraulic and flow hysteresis - pressure curves in the models of self-compensating emitters evaluated, correlation coefficients greater than 90% were obtained, obtaining polynomial equations under experimental conditions of the form  $y = ax^2 + bx + c$ .
- The curve that represents the discharge of the emitter in the ascent and descent phases is physically different in the three models of emitters evaluated, because the meniscus overpressure is different in both phases.
- The elastomer in the self-compensating emitters influences the presence of the phenomenon of hydraulic hysteresis, obtaining the best equation adjustment of  $qh$ : 99% in the Aqua Traxx irrigation tape.

## REFERENCES

- ARMONIS, S.: *Micro-Speinkler Irrigation Text Book*, Ed. Dan Sprinkler Kibbutz Dan, vol. Text Book, Israel, 2006.
- BLIESNER, R.D.: *Designing, operating and maintaining piping systems using PVC fittings*, Inst. Irrigation Association, Arlington, Va, 1990.
- BLIESNER, R.D.: *Designing, operating and maintaining piping systems using PVC fittings*, Ed. AVI-Van Nostran Reinhold, New York, USA, 652 p., 2006.

Coincidiendo con Casado y Sirgado (2015), el fenómeno de histéresis hidráulica ha sido poco estudiado sin embargo podemos afirmar la manifestación del fenómeno en las fases de ascenso y descenso. **Fase de ascenso:** para que el agua con tensión superficial ( $\sigma$ ) empiece a salir por el orificio de un emisor de diámetro ( $d$ ) en contacto con la atmósfera, es necesario que la presión ( $P$ ) en la tubería sea mayor de ( $4\sigma/d$ ) para poder vencer la sobrepresión que ejerce la tensión superficial ( $\sigma$ ) debido a la formación de un menisco convexo de diámetro  $d$  a la salida del orificio como se muestra en la ecuación 1.

$$P > \frac{4\sigma}{d} \quad (1)$$

Esta expresión indica que en un emisor de diámetro  $d$ , el agua comienza a salir por el orificio cuando la presión  $P$  es mayor que cuatro veces la tensión superficial  $\sigma$  del agua entre  $d$ ; pues se forma un menisco convexo que ejerce una sobrepresión sobre el emisor. Con la presión de la presión  $P$  solo pueden descargar los emisores que tengan un diámetro superior al diámetro mínimo requerido ( $d_{\min}$ ) que se calcula como se muestra en la ecuación 2.

$$d > \frac{4\sigma}{P_{\min}} \quad (2)$$

Después que se supera el valor de esta sobrepresión, se forma una película de agua alrededor de la tubería que elimina el menisco y los emisores funcionan normalmente.

**Fase de descenso:** la fase de descenso es diferente ya que no es necesario vencer la sobrepresión del menisco. Este comportamiento está relacionado con la reducción de la curvatura de las gotas al salir del emisor, debido a que la tubería se encuentra totalmente rodeada de una película de agua que disminuye considerablemente los efectos de la sobrepresión del menisco (Casado y Sirgado, 2015).

## CONCLUSIONES

- En la relación de las curvas histéresis hidráulica y caudal - presión en los modelos de emisores autocompensante evaluados se obtuvieron coeficientes de correlación superiores al 90 %, obteniéndose ecuaciones polinómicas en condiciones experimentales de la forma  $y = ax^2 + bx + c$ .
- La curva que representa la descarga del emisor en la fase de ascenso y descenso son físicamente diferentes en los tres modelos de emisores evaluados, debido a que la sobrepresión del menisco es diferente en ambas fases.
- El elastómero en los emisores autocompensante influye en la presencia del fenómeno de la histéresis hidráulica, obteniéndose el mejor ajuste de ecuación de  $qh$ :99% en la cinta de riego aqua traxx.

- BOMAN, J.B.: *Water and Florida Citrus: Use Regulation, Irrigation, Systems and Management*, Ed. University of Florida, Institute of Food and Agricultural Sciences, Florida, USA, 2002, ISBN: 0-916287-38-6.
- CARMENATES, H.D.; LÓPEZ, S.M.; MUJICA, C.A.; PANEQUE, R.P.: “Comparative study of Aqua Traxx watering belts, self-compensating and non-compensating models”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 28(2): 48-54, 2019, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054.
- CASADO, F.E.; SIRGADO, L.J.: “Ensayos y caracterización hidráulica de tuberías porosas para riego”, [en línea], En: *XXXIII CONGRESO NACIONAL DE RIEGOS. Valencia 16-18 junio de 2015*, Ed. Editorial Universitat Politècnica de València, Valencia, España, 2015, ISBN: 84-9048-374-4, Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4995/CNRriegos.2015.1519>.
- COELHO, R.D.: *Contribuições para a irrigação pressurizada no Brasil.*, Inst. Universidade de São Paulo, Livre-Docência-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, São Paulo, Brasil, 192 p., 2007.
- CUNHA, F.N.; DA SILVA, N.F.; FERREIRA, A.C.; DE OLIVEIRA, R.C.; TEIXEIRA, M.B.; SOARES, A.L.: “Caracterização de dois modelos de gotejadores quanto a ocorrência de histerese”, En: *Inovagri International Meeting. 28 al 31 de maio*, Fortaieza, Ceará, Brasil, 2008.
- GIL, M.J.A.; ALEMÁN, L.; HERNÁNDEZ, R.: “Evaluación del comportamiento hidráulico de varios emisores importados para riego por goteo”, *Revista Científica UDO Agrícola*, 2(1): 64-72, 2002, ISSN: 1317-9152.
- GOMES, L.; GOMES, A.; OLIVEIRA, R. de; TEIXEIRA, M.; BARROS, A.; COELHO, R.: “Desempenho de gotejadores em função da aplicação de turfa gel na água de irrigação”, *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, 7(1): 27-41, 2013.
- HERNÁNDEZ, J.M.: *El riego localizado. Componentes de la instalación*, Inst. Instituto de Hidroeconomía. Gobierno de Canarias. Consejería de Agricultura y Pesca. Centro Nacional de Investigación Agraria de Canarias, España, 146 p., 1987.
- IMTA. MX: *Comité Técnico de Normalización Nacional de Sistemas y Equipos de riego*, [en línea], Inst. Comité Técnico de Normalización Nacional de Sistemas y Equipos de riego, México, Vig de 2003, Disponible en: <http://www.imta.mx/otros/cursos/cotenns/e-225.htm>, [Consulta: 14 de mayo de 2018].
- ISO.9260: 91: *Equipos de riego para la Agricultura- goteros - especificaciones y métodos de prueba*, International Standar Organization ISO, Vig de 1991.
- PIZARRO, C.F.: *Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF) goteo, microaspersión, exudación*, España, 1987.
- PIZARRO, C.F.: *Riego Localizado de Alta Frecuencia (RLAF)*, Ed. Ediciones Mundi Prensa, 2da Edición ed., España, 1990.
- PIZARRO, F.: *Riegos localizados de alta frecuencia-goteo-microaspersión-exudación*, Ed. Editorial Mundi y Prensa, España, 1996.
- RIBEIRO, P.H.P.; TEIXEIRA, M.B.; COELHO, R.D.; UYEDA, C.A.; NETO, J.D.: “Caracterização hidráulica e histerese em tubos gotejadores utilizados na irrigação subsuperficial”, *Irriga*, 19(3): 430-440, 2014, ISSN: 1808-8546.
- TALAMINI, M.V.; DE ARAUJO, A.C.S.; DE CAMARGO, A.P.; SARETTA, E.; FEZZONE, J.A.: “Operational Characterization of Pressure Regulating Valves”, *Hindawi Scientific World Journal*, 9, 2018, DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/1213638>.
- VÉLEZ, S.J.E.; CAMACHO, T.J.H.; ÁLVAREZ, H.J.G.: “Evaluación de goteros utilizados en microirrigación en Colombia”, *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 7(2): 186-200, 2013, ISSN: 2011-2173.

---

Dayma Carmenates-Hernández, Profesora, Universidad Católica Sedes Sapientiae (UCSS), Facultad de Ingeniería, Lima, Perú, e-mail: [daymasadami@yahoo.com](mailto:daymasadami@yahoo.com)  
Miquel López-Silva, Profesor, Universidad Católica Sedes Sapientiae (UCSS), Facultad de Ingeniería, Lima, Perú, e-mail: [miquelcuba@yahoo.com](mailto:miquelcuba@yahoo.com)  
Albi Mujica-Cervantes, Profesor Titular, Universidad de Ciego de Ávila, Centro de Estudios Hidrotécnicos, Ciego de Ávila, Cuba, e-mail: [albi@unica.cu](mailto:albi@unica.cu)  
Pedro Paneque-Rondón, Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, Centro de Mecdanización Agropecuaria, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, e-mail: [paneque@unah.edu.cu](mailto:paneque@unah.edu.cu)

The authors of this work declare no conflict of interests.

This item is under license Reconocimiento-NoComercial de Creative Commons 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0).

The mention of trademarks of specific equipment, instruments or materials is for identification purposes, there being no promotional commitment in relation to them, neither by the authors nor by the publisher.