

EVOLUCIÓN DEL RADIO DE LA CAVIDAD ESFÉRICA DE UN EMISOR SUBSUPERFICIAL

María Gil Rodríguez¹, Leonor Rodríguez Sinobas¹, Raúl Sánchez Calvo¹ y Luis Juana Sirgado¹

1: Grupo de Investigación Hidráulica del riego
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos
Universidad Politécnica de Madrid
Ciudad Universitaria, 28040, Madrid

e-mail: maria.gil@upm.es; leonor.rodriguez.sinobas@upm.es; raul.sanchez@upm.es; luis.juana@upm.es

Palabras clave: Riego subsuperficial, riego por goteo, cavidad esférica.

RESUMEN. *Una de las desventajas del riego subsuperficial es que el caudal del emisor puede verse afectado por las características del suelo. Esto sucede porque se genera una presión positiva a la salida del emisor. Además, se supone que, alrededor de la misma, se forma una cavidad esférica en cuyo interior el agua fluye libremente. En condiciones de régimen permanente, la presión en el suelo se puede relacionar con las propiedades hidráulicas del suelo, el caudal del emisor y el radio de esta cavidad. La presión generada en el suelo es muy sensible a dicho radio. En este trabajo, se ha observado, en suelo franco uniforme, la formación de cavidades y se ha medido el radio de las mismas para distintos caudales del emisor. Así, se ha obtenido la tendencia entre caudal y presión en el suelo que ilustra el comportamiento de los emisores al ser enterrados en campo.*

ABSTRACT. *One of the disadvantages of subsurface drip irrigation is that emitters flow rate can be affected by soil properties. This happens because a positive pressure develops at the emitter outlet. Around this, a spherical cavity is supposed to be formed. In steady conditions, the pressure in the soil can be related to the soil hydraulic properties, the emitter flow rate and this cavity radius. The pressure generated in the soil is very sensitive to the cavity radius. In this paper, the development of cavities have been observed and measured for various emitter discharges in tests carried out in uniform loamy soils. The trend between soil pressure and emitter discharge has been established which illustrates the performance of buried emitters in the field.*

1. INTRODUCCIÓN

El riego por goteo subsuperficial es el método más avanzado de riego (Patel y Rajput, 2008). Una de sus desventajas respecto al riego por goteo superficial es la disminución de la uniformidad en la aplicación del agua en algunos tipos de suelos (Lazarovich et al, 2006; Rodríguez-Sinobas et al, 2009). Cuando se utiliza riego subsuperficial, el caudal de los emisores puede verse afectado por las propiedades hidráulicas del suelo (Shani et al. 1996; Gil et al. 2007; Gil et al. 2008). Se cree que el emisor subsuperficial está rodeado, normalmente, de una cavidad en la cual el agua puede fluir libremente (Philip, 1992; Ben-Gal et al, 2004). Si la descarga del emisor no es muy grande, la región saturada es aproximadamente esférica (Philip, 1992). Cuando esta cavidad se va llenando de agua, la infiltración se ve limitada por las propiedades hidráulicas del suelo y se desarrolla, en la misma, una presión positiva (Shani y Or, 1995; Shani et al, 1996; Gil et al. 2007; Gil et al. 2008).

El caudal que desagua un emisor subsuperficial cumple la relación potencial (Karmeli y Keller, 1975):

$$q = k \cdot h^x, \quad (1)$$

donde q [$L^3 \cdot T^{-1}$] es el caudal del gotero, h [L] es la presión de trabajo y x [-] y k [$L^{3-x} \cdot T^{-1}$] son constantes de ajuste de pares de valores medios de caudal y de presión de una muestra de emisores con la misma presión de trabajo y

se denominan constante y exponente del emisor, respectivamente.

Shani et al. (1996) midieron la presión del agua a la salida del emisor en varios suelos en campo. Si se desarrolla una sobrepresión h_s [L] alrededor de un emisor enterrado, el gradiente de presión entre el interior y el exterior del ramal disminuye de modo que (Warrick y Shani, 1996; Gil et al. 2008):

$$q = k \cdot (h - h_s)^x \quad (2)$$

Philip (1992) analizó el movimiento del agua a partir de una fuente puntual subsuperficial. Shani y Or (1995) utilizaron las conclusiones de Philip para relacionar la presión en el suelo, h_s con las propiedades del suelo y el caudal emitido por la fuente q .

$$h_s = \left(\frac{2 - \alpha_G \cdot r_0}{8\pi K_s \cdot r_0} \right) \cdot q - \frac{1}{\alpha_G} \quad (3)$$

r_0 [L] es el radio de la fuente (cavidad esférica), K_s [$L^1 \cdot T^{-1}$] es la conductividad hidráulica saturada y α_G [L^{-1}] es el exponente de la conductividad subsaturada de la ecuación de Gardner.

h_s es muy sensible a r_0 . En la mayoría de los estudios, cuando se simula el comportamiento de los emisores, r_0 se considera constante con respecto al caudal del gotero (Lazarovitch et al, 2005; Shani et al, 1996; Gil et al, 2008); en otros casos, se estima a partir de los valores experimentales del resto de los parámetros de la ecuación (3). Sin embargo, no se han encontrado trabajos en los que se hayan realizado observaciones experimentales de la formación de esta cavidad alrededor del emisor.

En trabajos previos de los autores, se observó una relación lineal entre valores estimados de r_0 y el caudal del emisor q . El objetivo de este trabajo es determinar la posible relación entre q y un r_0 directamente observado y medido.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para observar la formación de la cavidad en el suelo, se realizó una sección transversal en una maceta de 15 L de volumen dividiéndola en dos partes iguales. Se fijó una lámina de metacrilato a una de las partes obteniéndose un recipiente cerrado con la forma de media maceta. En el eje central de la maceta se fijó un tubo de 6 mm de diámetro interior, también de metacrilato, seccionado por la mitad (Figura 1a). El agua se introducía a una profundidad de 11 cm de la superficie del suelo. El tubo de metacrilato se alimentaba, a través de un tubo de plástico de 6 mm de espesor, desde un emisor pinchado en un ramal de 2 m de longitud (Figura 1c). Este ramal estaba colocado en un banco de emisores y era alimentado por ambos extremos (Figura 1b). La presión h , medida en el centro del ramal con un manómetro de precisión $\pm 0,25\%$ MPa, se mantuvo constante a lo largo del ensayo.

Para medir la evolución del caudal con el tiempo se utilizó una célula de carga de 20 kg de carga nominal y precisión $\pm 0,002$ kg que medía el aumento del peso de cada maceta en el tiempo. Esta medida se registró, mediante una tarjeta de adquisición de datos, en un ordenador.

La duración del ensayo quedó determinada por el tiempo transcurrido hasta que la presión en el suelo se estabilizaba. Al final de cada ensayo, se dibujaba la cavidad formada en la lámina de metacrilato y se medían con un micrómetro digital de precisión $\pm 0,000001$ m las longitudes necesarias para calcular el área de la misma. Asimismo, se midió la presión h_t correspondiente al extremo superior del tubo de plástico, con un manómetro digital de precisión $\pm 0,01$ m. La presión en el punto de desagüe del tubo h_s se determinó sumándole a la presión h_t la diferencia de cota (20 cm) entre el punto de toma del manómetro y el del extremo del tubo enterrado (Figura 1b).

Para observar el efecto de las propiedades hidráulicas del suelo en el comportamiento del emisor, se seleccionaron suelos de dos texturas distintas (según clasificación USDA), un suelo arenoso (AR) y otro franco (FR), que se cribaron con un tamiz de 1 mm de luz. La textura de las muestras de suelo se determinó en laboratorio mediante el método del densímetro de Bouyoucos (Day, 1965) y se muestra en la Tabla 1. Los suelos fueron secados a temperatura ambiente durante, al menos, una semana.

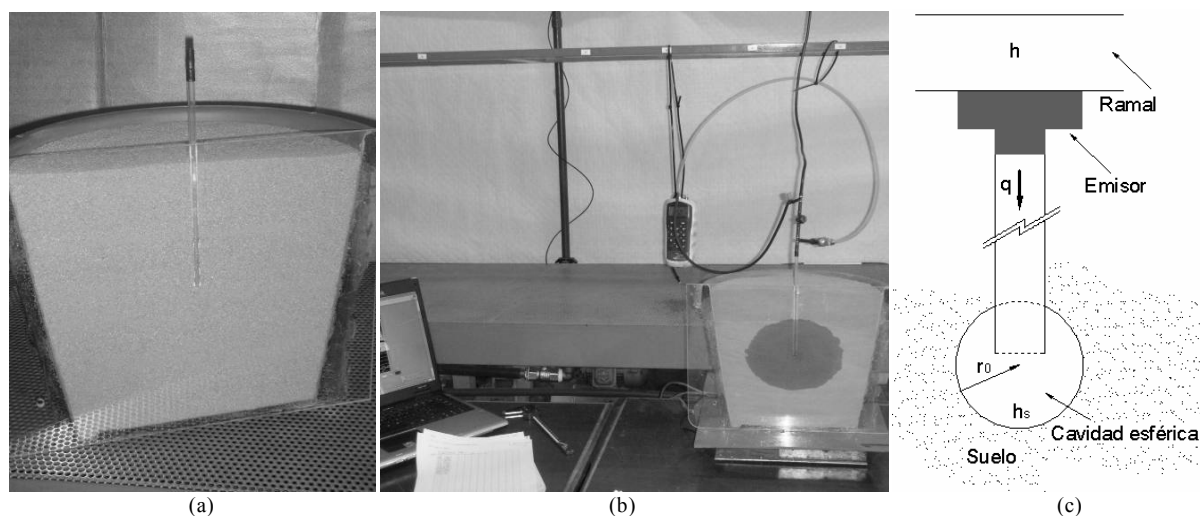


Figura 1. Procedimiento experimental. (a) Sección transversal de la maceta. (b) Equipos de medida utilizados en cada ensayo. (c) Detalle de la cavidad esférica y del conjunto de variables que intervienen en el fenómeno.

La densidad aparente D_a [ML^{-3}] en ambos suelos se fijó en $1,4 \text{ g/cm}^3$ por lo que el llenado de las macetas consistió en añadir, cada vez, un peso constante de suelo y compactarlo hasta llegar a una altura, calculada previamente, para obtener un volumen de medio litro.

Tabla 1. Fracciones de suelo (%) determinadas por el método del densímetro de Bouyoucos.

	Suelo AR	Suelo FR
Arena	91	50
Limo	8	32
Arcilla	1	18

Se seleccionaron dos modelos de emisores pinchados no compensantes de 2 L/h (modelo A) y 4 L/h (modelo B) de caudal nominal que se ensayaron a diferentes presiones del ramal para conseguir un mayor rango de caudales.

Las características hidrofísicas de los dos suelos se determinaron según el modelo de van Genuchten-Mualem (van Genuchten, 1980) mediante el código ROSETTA, calculándose los parámetros de la curva de retención de agua y la conductividad hidráulica saturada del suelo, a partir de su textura y D_a .

Mediante este método se determinaron los parámetros hidrofísicos del suelo como contenidos de humedad residual θ_r [-] y a saturación θ_s [-], parámetros empíricos α [L^{-1}] y n [-] y la conductividad hidráulica a saturación K_s .

Una vez conocidos los parámetros del modelo de van Genuchten-Mualem, el parámetro α_G del modelo de Gardner se determinó igualando el potencial de Kirchhoff ϕ [$L^2 \cdot T^{-1}$]:

$$\phi = \int_{-\infty}^0 K(h) dh \quad (4)$$

de este último modelo con el del modelo van Genuchten-Mualem y sustituyendo

$$\alpha_G = \frac{K_s}{\phi} \quad (5)$$

La integración de (4) para el modelo de van Genuchten-Mualem se hizo numéricamente.

Determinados estos parámetros, se calculó el radio de la cavidad r_0 para cada caso mediante la ecuación:

$$r_0 = \frac{2 \cdot q \cdot \alpha_G}{8\pi \cdot K_s \cdot (\alpha_G \cdot h_s + 1) + (\alpha_G^2 q)} \quad (6)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los ensayos con el suelo arenoso se observó una pequeña cavidad semielipsoidal tan pequeña que no pudo medirse. Además, no se observó una evolución de su tamaño con el aumento del caudal. Por eso, en los resultados que se muestran sólo se han considerado los datos obtenidos con el suelo franco.

En este último suelo, se observó, claramente, la formación de cavidades que pudieron ser medidas (Figura 2). La forma de estas fue elipsoidal para los caudales más bajos. A medida que el caudal aumentaba, se detectó la formación de grietas horizontales. No obstante, se observó que estas grietas tendían a cerrarse con las partículas que iban siendo arrastradas por el agua que fluía por la cavidad, tendiendo a ser cada vez más esféricas con el tiempo.

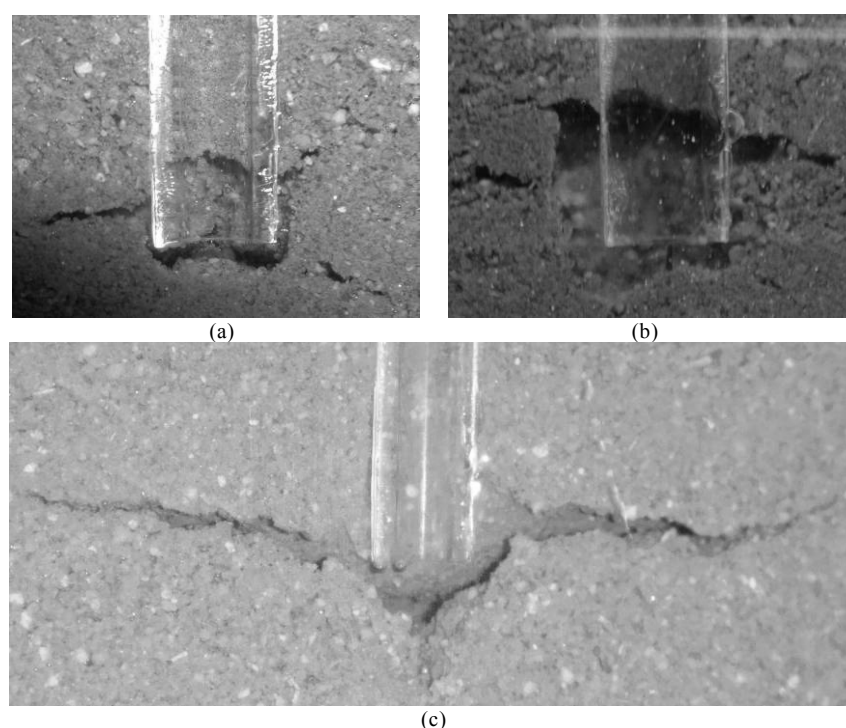


Figura 2. Ejemplos de cavidades formadas (a) $q = 4,21$ L/h; (b) $q = 5,13$ L/h; (c) $q = 7,88$ L/h

En la Tabla 2 se muestran las áreas de las cavidades que se midieron en los diferentes ensayos con el suelo franco, así como los radios de las cavidades en caso de que éstas fueran esféricas $r_{0 \text{ equiv}}$. En la tabla también se muestra, para cada modelo de emisor, la presión en el ramal h , la presión en el suelo estabilizada generada durante los ensayos h_s y el caudal medio a lo largo del ensayo q . Hay que tener en cuenta que el caudal q que aparece en la tabla es el doble del registrado por la célula de carga, ya que sería el caudal resultante si consideramos una maceta completa en lugar de media utilizada en los ensayos.

Tabla 2. Resultados de los ensayos.

Emisor	h (mca)	h _s (mca)	q (L/h)	Área (mm ²)	r ₀ equiv (m)
A	5	0,6	3,05	20,19	0,0025
A	10	0,6	4,21	57,20	0,0043
A	12	0,6	4,63	69,37	0,0047
A	15	0,5	5,13	95,33	0,0055
B	6	0,6	6,16	142,40	0,0060
B	10	0,5	7,88	191,92	0,0068
B	15	0,6	9,40	202,13	0,0070

Como se observa, el radio de la cavidad aumentó con el caudal del emisor. En la figura 3 se muestra que dicho aumento es lineal en los caudales más pequeños, y tiende a estabilizarse en los caudales más grandes.

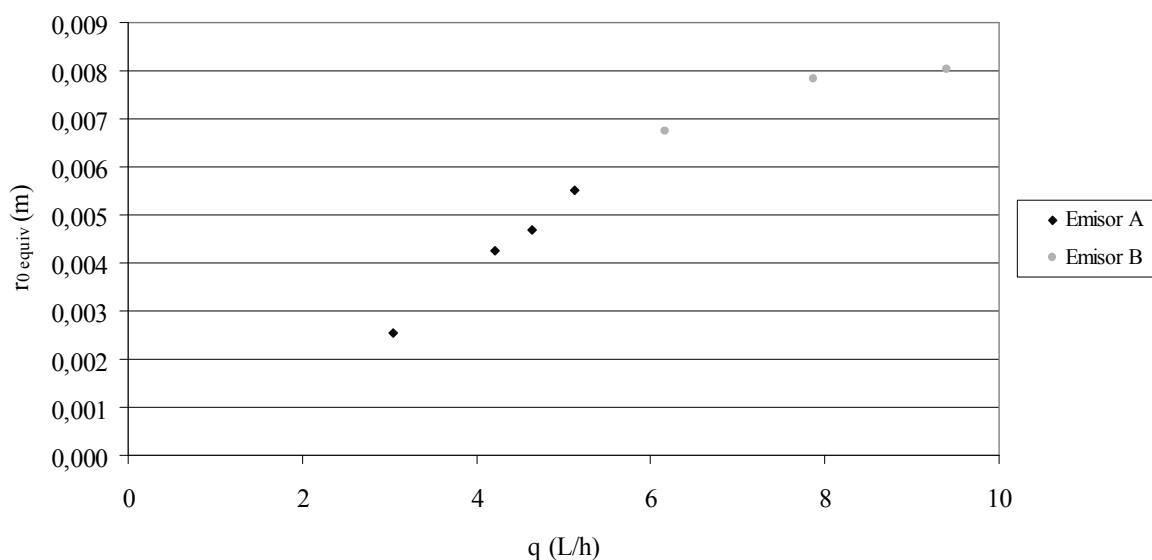


Figura 3. Evolución del radio de la cavidad esférica r_0 con el caudal q

Como era de esperar, h_s aumentaba rápidamente al comienzo del ensayo. En cambio, luego disminuía; esta disminución era más acusada al principio y se hacía cada vez más lenta al hasta que la presión se estabilizaba (Figura 4). Dicho valor, no aumentó al aumentar el caudal del ensayo y se mantuvo entre 0,6 y 0,5 m a pesar de que el caudal varió entre 3,05 y 9,40 L/h. Estos resultados coinciden con los trabajos realizados por los autores previamente con este suelo franco (Gil et al 2007; Gil et al 2008), en los que la presión en el suelo se mantuvo prácticamente constante con el caudal. Sin embargo, los resultados contrastan con las observaciones de otros autores, como Shani et al (1996), en las que la presión del suelo aumentó con el caudal del emisor. No obstante, se debe destacar que estos ensayos se realizaron en campo y que las características del suelo serán, probablemente, diferentes.

La disminución de h_s coincidió con el aumento del tamaño de la cavidad en el tiempo. En estas experiencias los valores de h_s fueron menores que en experiencias previas, lo que indica que las cavidades formadas en aquel caso serían más pequeñas que las actuales. La diferencia de tamaño en la cavidad esférica observada para un mismo caudal de emisor puede ser debida a la profundidad a la que descargaba el emisor. Los emisores utilizados en este trabajo desaguaban a una menor profundidad que en las otras experiencias y, puesto que el suelo de la maceta carece de estructura, el peso de suelo sobre el emisor puede influir en deformación del suelo, a mayor profundidad se produciría una deformación menor.

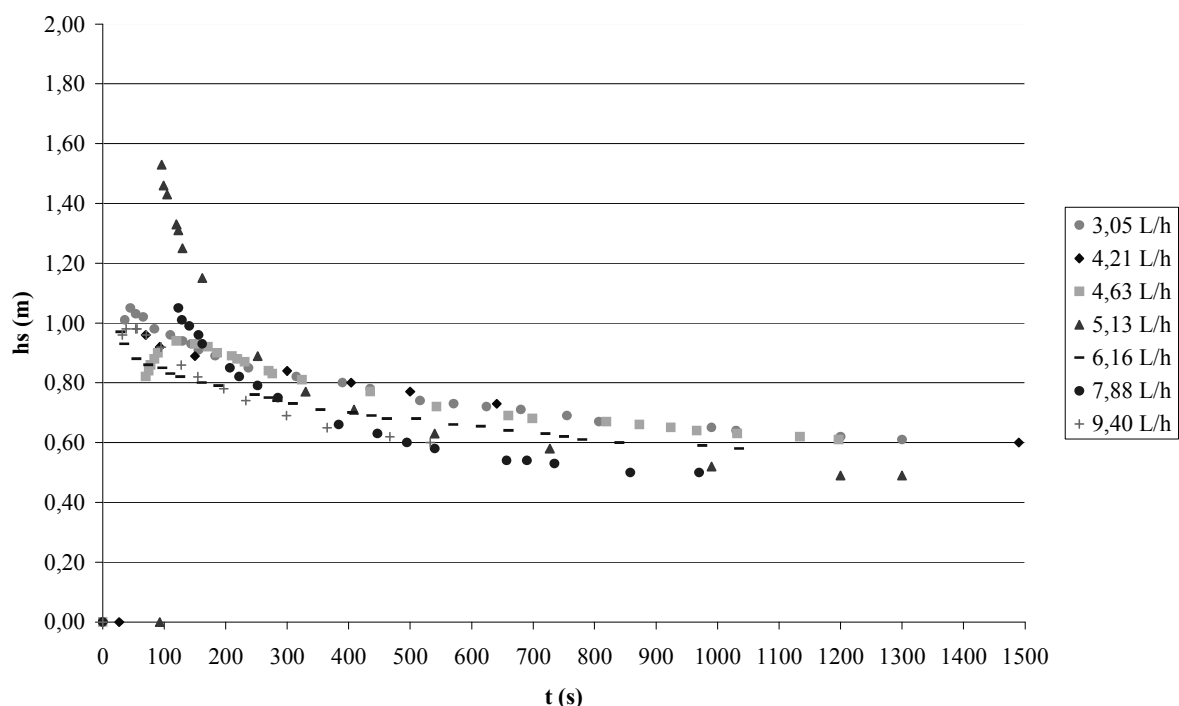


Figura 4. Evolución de la presión en el suelo en el tiempo

Se han estimado las características hidrofísicas del suelo mediante el código ROSETTA a partir de los porcentajes texturales de la Tabla 1 y Da. En la Tabla 3, se muestran los resultados obtenidos para el suelo franco.

Tabla 3. Propiedades hidrofísicas del suelo según el modelo de van Genuchten-Mualem mediante el código ROSETTA y parámetro α de Gardner

θ_r (m^3/m^3)	θ_s (m^3/m^3)	α (m^{-1})	n	K_s (m/s)	α_G (m^{-1})
0,0567	0,4130	1,3	1,5	$3,2 \cdot 10^{-6}$	4,5

A continuación se han calculado los r_0 a partir del resto de los parámetros de la ecuación (3). Los valores de r_0 calculados de esta manera $r_{0 \text{ ROSETTA}}$ fueron mayores que los medidos (Figura 5a). No obstante, se observa que, a pesar de ser los valores tan diferentes, el comportamiento es el mismo, esto es, el radio de la cavidad tiende a aumentar linealmente con el caudal del emisor en el rango de caudales más pequeños y luego tiende a estabilizarse a partir de un cierto caudal.

Si se modifica K_s en un orden de magnitud aproximadamente, se obtienen valores del radio de la cavidad $r_{0 \text{ rectific}}$ que se ajustan bien a los valores medidos. Esta rectificación se realizó dado que, en anteriores estudios con este suelo se determinó, con un permeámetro de carga variable, un valor de conductividad hidráulica a saturación del orden de 10^{-5} m/s. En efecto, con un valor de $K_s = 2,8 \cdot 10^{-5}$ m/s, los valores $r_{0 \text{ rectific}}$ están dentro de un intervalo de confianza del 10% (Figura 5b).

Se decidió modificar únicamente K_s puesto que en el estudio de sensibilidad de Lazarovith et al (2006), se observó que, de todas las variables de la ecuación (3), ésta era la que más afectaba a r_0 . Por otra parte, el valor de K_s utilizado en un principio es el estimado con el código ROSETTA a partir de dos parámetros: textura y densidad aparente y podría no coincidir con el real del suelo de la maceta.

La cavidad esférica es, probablemente más grande en la experiencia con macetas que lo que cabría esperar en campo por la falta de estructura del suelo y porque al estar enterrado el punto de desagüe a pequeña profundidad (11 cm), el peso del suelo en ese punto es menor que en el campo y, se opondría, en menor medida, a la deformación del suelo.

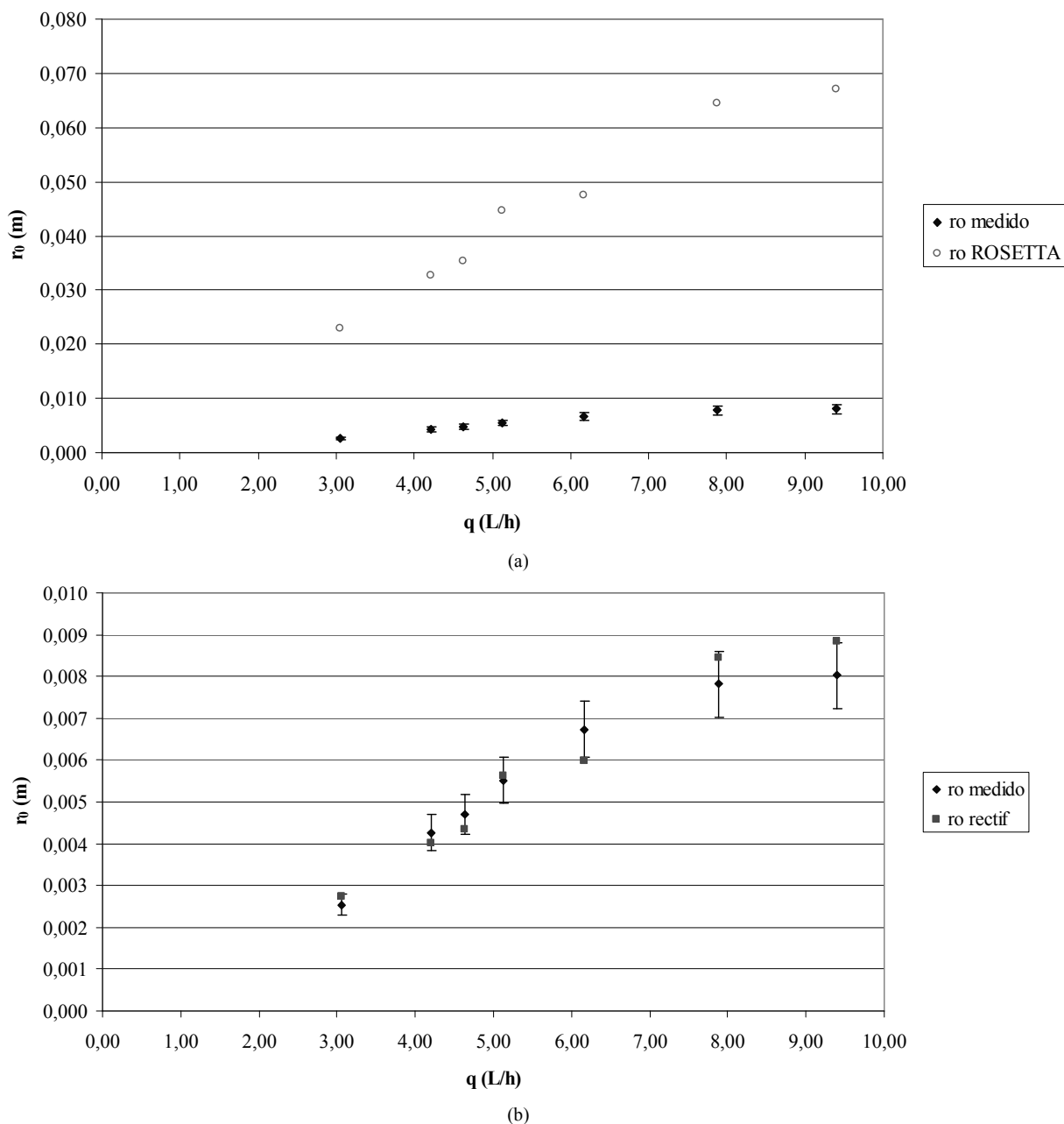


Figura 5. Evolución del radio de la cavidad esférica r_0 medida y calculada con los parámetros del suelo calculados con ROSETTA y rectificando K_s .

4. CONCLUSIONES

La cavidad formada que se observa en el desagüe de un emisor de riego por goteo subsuperficial en las condiciones de los ensayos (muestras de suelo uniforme en macetas) tiende a ser esférica con caudales de emisores pequeños. Cuando el caudal es mayor tienden a formarse grietas horizontales que se rellenan de material del propio suelo con el tiempo teniendo, finalmente, también forma esférica, por lo que se comprueba el supuesto de Philip (1992).

Las medidas de la cavidad esférica muestran que el radio de la misma aumenta linealmente con el caudal del emisor para valores pequeños del mismo y tiende a estabilizarse a partir de un determinado valor.

La disminución con el tiempo de la presión en el suelo en el punto de desagüe del emisor coincidiría con el aumento del radio de la cavidad esférica formada.

Agradecimientos. Los autores quieren agradecer el apoyo de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT) a sus trabajos mediante el proyecto de investigación de código AGL2008-00153/AGR.

REFERENCIAS

- Ben-gal A., N. Lazarovitch y U. Shani, 2004. Subsurface drip irrigation in gravel filled cavities. *Vadose Zone journal* 3: 1407-1413.
- Day P.R., 1965. Particle fractionation and particle-size analysis. In: *Black CA et al (ed) Methods of soil analysis. Part I: Agronomy* 9: 545-567
- Gardner W.R., 1958, Some steady state solutions of unsaturated moisture flow equations with application to evaporation from a water table. *Soil Science* 85: 228-232
- Gil M., L. Rodríguez-Sinobas, R. Sánchez, L. Juana y A. Losada, 2007. Efecto del suelo en el caudal del gotero en riego subsuperficial. Determinación de caudales máximos. *XXV Congreso Nacional de Riegos*, Pamplona (España)
- Gil M., Rodríguez-Sinobas, L., Juana, L., Sánchez, R. y Losada, A., 2008. "Emitter discharge variability of subsurface drip irrigation in uniform soils. Effect on water application uniformity". *Irrig. Sci.*, 26:451-458.
- Karmeli D. y J. Keller, 1975. Trickle irrigation design. *Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corp.* Glendora. California
- Lazarovitch N., J. Simunek y U. Shani, 2005. System dependent boundary conditions for water flow from a subsurface source. *Soil Sci Soc Am J* 69: 46-50
- Lazarovitch N., U. Shani, T.L. Thompson y A.W. Warrick, 2006. Soil hydraulic properties affecting discharge uniformity of gravity-fed subsurface drip irrigation. *J Irrig Drain Eng* 132: 531-536
- Patel N. y T.B.S. Rajput, 2008. Dynamics and modeling of soil water under subsurface drip irrigated onion. *Agricultural Water Management* 95(12):1335-1349
- Philip, J.R., 1992. What happens near a quasi-linear point source? *Water Resources Research* 28: 47-52.
- Rodríguez-Sinobas L., M. Gil, R. Sánchez y L. Juana, 2009. Water distribution in subsurface drip irrigation Systems. II: Field evaluation. *J. Irrig. Drain.* (En prensa).
- Shani U. y D. Or, 1995. In situ method for estimating subsurface unsaturated hydraulic conductivity. *Water Resources Research* 21:1863-1870.
- Shani U., S. Xue, R. Gordin-Katz y A.W. Warrick, 1996. Soil-limiting from Subsurface Emitters. I: Pressure Measurements, *J Irrig Drain Eng* 122: 291-295
- Van Genuchten M.Th., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci Soc Am J* 44: 892-898
- Warrick A.W., U. Shani, 1996. Soil-limiting flow from subsurface emitters. II: Effect on uniformity. *J Irrig Drain Eng* 122: 296-300