

DISPOSITIVOS AFORADORES MÓVILES DE BAJO COSTO

Schilardi C.^{1,2}, Morábito J. A.^{1,3}

(1) Facultad de Ciencias Agrarias-UNCuyo. Almirante Brown (5507), Mendoza – Argentina.

E-Mail: eschila@irrigacion.gov.ar

(2) Departamento General de Irrigación

(3) Instituto Nacional del Agua – Centro Regional Andino

RESUMEN:

Conocer el caudal de ingreso y en su caso, el escurrido de la parcela bajo riego, es un dato fundamental para el diseño y optimización de la operación de los sistemas de riego por superficie. Existen una amplia variedad de dispositivos para monitorear en forma continua el caudal en cada una de las fases de operación del riego. Para el monitoreo y evaluación del riego a nivel parcelario los más utilizados son los aforadores y vertederos (Kindsvater y Carter, 1957; Robinson y Chamberlain, 1960; Shen, 1960; Israelsen y Hansen, 1965; Skogerboe et al, 1967; Withers, B and Vipond, S., 1974; Bos et al, 1986). En cada caso para conseguir valores aceptables en las mediciones del caudal es de suma importancia que el dispositivo seleccionado sea instalado adecuadamente a campo (nivelado) y se encuentre hidráulicamente calibrado (curva de gasto ajustada). El objetivo del presente trabajo es la puesta a punto y evaluación de aforadores tubulares propuestos por Samani y Herrera 2001 y Al-Kahidi 2005. Se realizaron evaluaciones a campo utilizando aforadores tubulares (2''x6''), calibrando su curva de gasto con aforadores trapezoidales (Robinson y Chamberlain, 1960). Los resultados indican que mientras se mantenga el régimen crítico en la sección de control, los dispositivos evaluados presentan un error de hasta el 5% en la medición del gasto o caudal, lo que se considera apropiado para su utilización en la evaluación de los métodos de riego por superficie. La ventaja que presenta respecto a resto de los dispositivos es que tiene poca pérdida de carga, son de fácil instalación y de construcción económica.

Palabras clave: riego superficial, aforadores, curva de gasto, vertederos.

INTRODUCCIÓN

Conocer el caudal de ingreso y en su caso, el escurrido de la parcela bajo riego, es un dato fundamental para el diseño y optimización de la operación de los sistemas de riego por superficie. Existen una amplia variedad de dispositivos para monitorear en forma continua el caudal en cada una de las fases de operación del riego. Para el monitoreo y evaluación del riego a nivel parcelario los más utilizados son los aforadores y vertederos (Kindsvater y Carter, 1957; Robinson y Chamberlain, 1960; Shen, 1960; Israelsen y Hansen, 1965; Skogerboe et al, 1967; Withers, B and Vipond, S., 1974; Bos et al, 1986). En cada caso para conseguir valores aceptables en las mediciones del caudal es de suma importancia que el dispositivo seleccionado sea instalado adecuadamente a campo (nivelado) y se encuentre hidráulicamente calibrado (curva de gasto ajustada).

Samani y Magallanez (1993) investigaron el aforo de un canal trapezoidal mediante la instalación de una tubería colocada axialmente. Ammari (2002) determinó la posibilidad de medir el flujo en un canal rectangular utilizando un cilindro portátil. Wahl et al, (2005) presentan para una gran variedad de dispositivos de aforo, que incluyen métodos de aforo en tuberías circulares, tablas de fácil utilización que incluyen las dimensiones para su construcción, requerimientos de carga y sus correspondientes ecuaciones de gasto. Shamel I. Al-Kadhi (2006) analizaron los aforadores tubulares con una técnica simple y portátil de bajo costo, desarrollando un factor de corrección de flujo que considera el efecto de las curvaturas de líneas de flujo. Los aforadores de flujo tubulares o circulares son un dispositivo apropiado para medir el flujo a través de surcos porque su forma circular se adapta a la forma natural de un surco, lo que reduce la posibilidad de flujo lateral (Sammani Z. and Herrera E., 2001). Los dispositivos mencionados, también han sido utilizados con éxito en canales no revestidos.

El aforador circular es un dispositivo simple, hecho de dos piezas de cloruro de polivinilo (PVC), una instalada verticalmente dentro de la otra (Figura. 1). El diámetro de la columna interior debe ser de aproximadamente un tercio del diámetro del canal o tubería de flujo (0,25 a 0,32). La columna interior reduce la sección transversal del flujo, creando una condición de flujo crítico. Una escala ubicada aguas arriba de la columna interna (Figura 1) mide la profundidad del agua aguas arriba de la sección de flujo crítico, la misma se relaciona con el flujo o caudal que atraviesa el dispositivo. Para un adecuado funcionamiento del dispositivo aforador, debe ser instalado en un nivel mínimo donde la profundidad de aguas abajo de la columna de agua dividida por la profundidad o tirante en la zona de medición (escala) sea inferior a 0,85. Si esta relación es superior a 0,85, se deberá elevar el dispositivo lo suficiente como para reducir esta relación, de forma tal de lograr que el aforador trabaje en condiciones de flujo libre y no exista influencia del nivel de aguas abajo en la lectura del mismo.

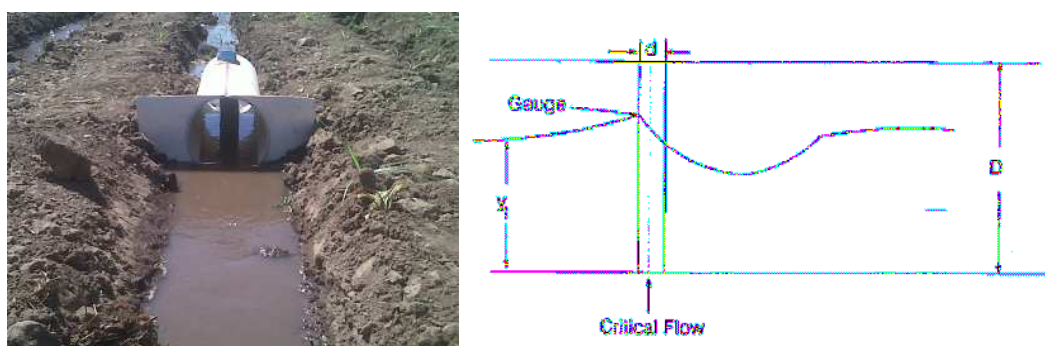


Figura 1: Dispositivo aforador circular

Sammani Z. and Herrera E., 2001; caracterizan 4 estructuras detalladas en tabla 1, Shamel I. Al-Kadhi (2006) determinan ecuaciones de calibración sobre estas estructuras incorporando un factor de corrección que considera el efecto de las curvaturas de líneas de flujo:

Tabla 1: Estructuras de aforo tubulares propuestas por Sammani y Herra (2001)

Modelo	Q _{min} (L/s)	Q _{max} (L/s)	Ecuación de Gasto (h _{cm} – Q _{L/s})
6" x 2" *	0.13	7.00	Q _(L/s) = 0,0163 h _(cm) ^{2,4176} r ² =0,99
12" x 4"	0.05	39.00	Q _(L/s) = 0,0074 h _(cm) ^{2,7173} r ² =0,98
16" x 8"	0.05	154.00	Q _(L/s) = 0,0065 h _(cm) ^{2,7582} r ² =0,97
32" x 12"	0.12	805.00	Q _(L/s) = 0,0076 h _(cm) ^{2,6734} r ² =0,99

*dispositivo evaluado a campo en el presente estudio

Las ecuaciones (1) y (2) describen el flujo en aforadores tubulares, la ecuación (3) permite obtener el factor de corrección (FC) como se observa en la ecuación (4), las mismas fueron determinadas por Shamel I. Al-Kadhi 2006 para el modelo 6'' x 2'':

$$Q_{(L/s)} = 0,0183h_{(cm)}^{2,2662} \quad r^2 = 0,99 \quad (1)$$

$$Q_{(L/s)} = 7,6519 \left(\frac{h_{(cm)}}{D} \right)^{2,1744} \quad r^2 = 0,99 \quad (2)$$

$$FC = 0,0114h_{(cm)} + 0,9853 \quad r^2 = 0,84 \quad (3)$$

$$Q_{(L/s)} = 7,6519 \left(\frac{h_{(cm)}}{D} \right)^{2,1744} \times FC \quad r^2 = 0,84 \quad (4)$$

Donde:

Q_(L/s): caudal o gasto en L/s

D: diámetro de la tubería horizontal en cm

FC: factor de corrección de caudal

h: altura de la cámara de carga en cm

El objetivo del presente trabajo es la puesta a punto y evaluación de aforadores tubulares de surcos (6''x 2'') propuestos por Samani y Herrera 2001 y Shamel I. Al-Kadhi 2006, de forma tal de validar su utilización a campo para el diseño y optimización de la operación de los sistemas de riego por superficie.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la validación y ajuste de la curva de gasto de aforadores tubulares, se realizaron ensayos de medición del gasto a campo sobre surcos limpios para evitar que la rugosidad de los suelos pudieran afectar los valores obtenidos. Aguas arriba del aforador tubular se colocó un aforador trapecoidal (Robinson y Chamberlain, 1960) previamente calibrado, de forma tal de controlar y verificar la precisión de los datos obtenidos. Los aforadores fueron adecuadamente instalados a nivel, verificándolo con nivel de burbuja. Para el procedimiento de calibración de la curva de gasto del aforador tubular a campo, se utilizó el procedimiento mencionado por Merckley (2004), para la toma de datos de campo se instalaron ambos aforadores lo más cerca posible uno del otro observando que el instalado aguas abajo no influyera en las condiciones

de flujo de aquel instalado aguas arriba. Para la toma de datos se deja que circule el agua por el surco un cierto tiempo hasta alcanzar la infiltración básica de los suelos para evitar que la infiltración -en el momento inicial del mojado del surco- pueda influir y generar error en los datos. Finalmente se realizó un análisis estadístico para verificar el ajuste de las curvas de gasto propuestas por Sammani y Herra (2001); Shamel I. Al-Kadhi 2006 y la obtenida de forma práctica a campo.

Para el análisis estadístico de las diferentes curvas de gasto se aplicó para cada caso, análisis de la varianza unifactorial, por lo cual el modelo general planteado fue:

$$\gamma_{ij} = \mu + \tau_j + \varepsilon_{ij} \quad (5)$$

donde:

γ_{ij} : es la respuesta de la i-ésima repetición del j-ésimo tratamiento

μ : es la media general

τ_j : es el efecto del j-ésimo tratamiento

ε_{ij} : es el error de la i-ésima repetición del j-ésimo tratamiento

Las hipótesis estadísticas para cada caso son:

Hipótesis nulas H_0 : $\tau_j = 0$

Hipótesis alternativa H_1 : $\tau_j \neq 0$

Para cada caso cuando el estadístico F fue significativo se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Scheffé para un nivel de significancia del 5%, los test de rangos múltiples permitieron identificar las medias que son significativamente diferentes unas de otras. En caso de falta de normalidad de los datos analizados se procedió al análisis de los mismos mediante el test de Kruskal-Wallis que compara las medianas en lugar de las medias. Se utilizó la aplicación STATGRAPHICS Plus 5.1 (Statistical Graphics Corp., 2000).

RESULTADOS

La Tabla 1 muestra las mediciones efectuadas a campo para la verificación de la curva de gasto del aforador tubular, se detalla: altura de escala del aforador trapezoidal calibrado (h trapezoidal (cm)); caudal observado del aforador trapezoidal (QT (L/s)); altura de escala del aforador tubular (h tubular (cm)); caudal observado del aforador tubular según ecuación de Samani y Herrera (QB₁ (L/s)); factor de corrección por el efecto de las curvaturas de líneas de flujo; caudal observado del aforador tubular según ecuación de Shamel I. Al-Kadhi (QB₂ (L/s)); caudal observado del aforador tubular según ecuación práctica determinada a campo (QP (L/s)).

Tabla1: Datos de ensayo de calibración obtenidos a campo

Hora	h Trapezoidal (cm)	QT (L/s)	h Tubular (cm)	QB ₁ (L/s)	FC	QB ₂ (L/s)	QP (L/s)
10:43	7.4	0.74	4.8	0.72	0.99	0.62	0.78
10:45	7.4	0.74	4.8	0.72	0.99	0.62	0.78
10:46	7.3	0.71	4.7	0.69	0.99	0.59	0.74
10:48	7.3	0.71	4.7	0.69	0.99	0.59	0.74
10:51	7.3	0.71	4.8	0.72	0.99	0.62	0.78
10:53	6	0.43	3.8	0.41	0.99	0.37	0.42
10:55	6.3	0.48	3.9	0.44	0.99	0.39	0.45
10:57	6.3	0.48	3.9	0.44	0.99	0.39	0.45
10:58	5.6	0.36	3.5	0.34	0.99	0.31	0.33
10:59	5.6	0.36	3.5	0.34	0.99	0.31	0.33
11:00	5.5	0.34	3.5	0.34	0.99	0.31	0.33
11:05	5	0.26	3.2	0.27	0.99	0.25	0.26
11:07	4.5	0.20	2.9	0.21	0.99	0.21	0.20
11:10	4.6	0.21	2.9	0.21	0.99	0.21	0.20
11:16	4.9	0.25	3	0.23	0.99	0.22	0.22
11:20	4.7	0.22	3	0.23	0.99	0.22	0.22
11:30	4.7	0.22	3	0.23	0.99	0.22	0.22
11:35	3.4	0.10	2.2	0.11	0.99	0.11	0.10
11:41	3.5	0.10	2.5	0.15	0.99	0.15	0.14

La figura 1, detalla las mediciones efectuadas a campo en ambos aforadores (trapezoidal-tubular) y para las ecuaciones analizadas a campo (Samani y Herrera; Shamel I. Al-Kadhi y la obtenida de forma práctica en campo). La figura 2 muestra las respectivas curvas de gasto para las ecuaciones antes mencionadas considerando y para el rango de caudales ensayados a campo en ella se detalla: curva de gasto según Samani y Herrera (QSH); curva de gasto según Shamel I. Al-Kadhi (QSA) y curva de gasto práctica de campo (QPC) .

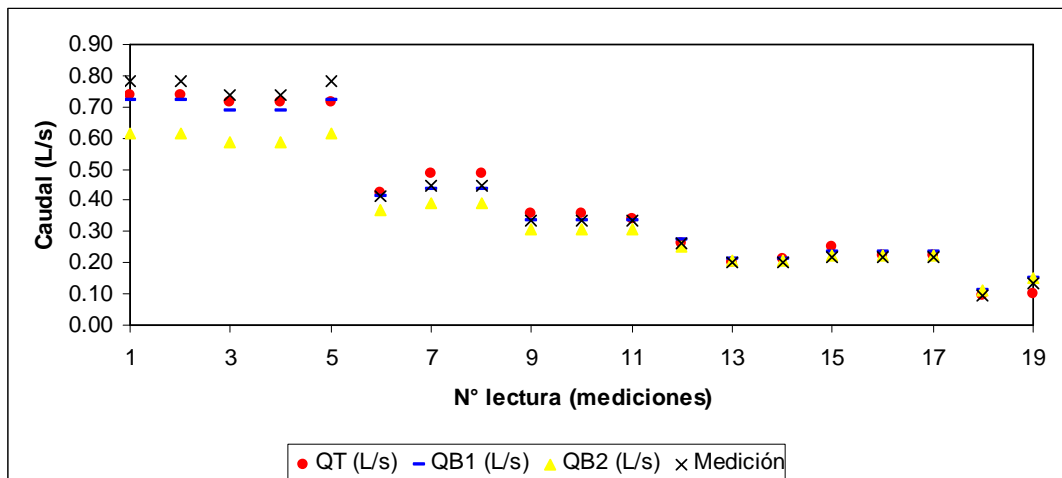


Figura 1: Caudales obtenidos por diferentes ecuaciones y aforadores en ensayo a campo

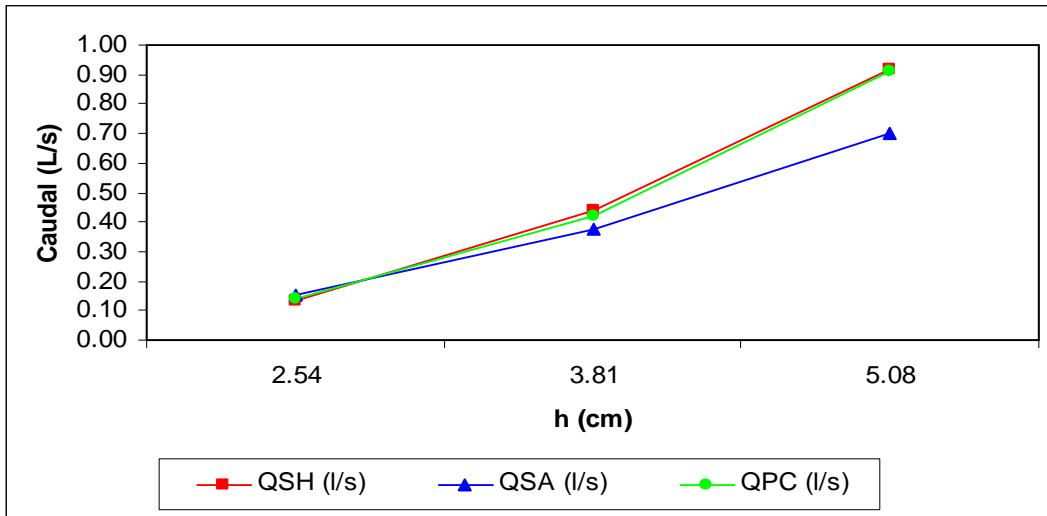


Figura 2: Curva de gasto para las ecuaciones de caudal analizadas

Las tablas 2, 3, 4 y 5, representan los análisis estadísticos de las 4 curvas de gastos analizadas, 1) aforador trapezoidal; 2) Tubular Samani, 2) Tubular Shamel y 4) Práctica

Tabla 2: Análisis de la varianza

Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	0.0323513	3	0.0107838	0.24	0.8711
Intra grupos	3.29233	72	0.0457268		
Total (Corr.)	3.32468	75			

Según Tabla 2 de análisis de la varianza, el valor de F es igual a 0.24. Puesto que el p-valor del test F es superior o igual a 0.05, no hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 4 variables a un 95%.

Tabla 3: Contraste múltiple de rango para caudal según ecuación

Ecuación	Frec.	Media	Grupos homogéneos
Shamel	19	0.4	a
Samani	19	0.4	a
Trapezoidal	19	0.4	a
Práctica	19	0.4	a

La tabla 3, muestra el procedimiento de comparación múltiple para determinar las medias que son significativamente diferentes unas de otras. Según los datos obtenidos, no hay diferencias estadísticamente significativas entre ningún par de medias a un nivel de confianza.95.0%.

La tabla 4, comprueba la hipótesis nula de que la desviación típica dentro de cada una de las 4 ecuaciones analizadas es la misma. De particular interés están los tres p-valores. Dado que el menor de los p-valores es superior o igual a 0.05, no hay diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones típicas para un nivel de confianza del 95.0%.

Tabla 4: Prueba de hipótesis de la desviación típica de las ecuaciones analizadas

Contraste C de Cochran: 0.315422	P-valor = 0.714707
Contraste de Bartlett: 1.02829	P-valor = 0.580138
Contraste de Hartley: 1.92449	
Test de Levene: 0.544898	P-valor = 0.653156

La Tabla 5 detalla el test de Kruskal-Wallis, donde prueba la hipótesis nula de igualdad de las medianas dentro de cada una de las 4 ecuaciones analizadas. Puesto que el p-valor es superior o igual a 0.05, no hay diferencia estadísticamente significativa entre las medianas a un nivel de confianza del 95.0%.

Tabla 5: Contraste de Kruskal-Wallis para Caudal según Ecuación

Ecuación	Tamaño muestral	Rango Promedio
Práctica	19	39.7368
Samani	19	39.5526
Shamel	19	35
Trapezoidal	19	39.7105

DISCUSIÓN

Según los análisis estadísticos realizados no se observan diferencias significativas para las ecuaciones de caudal analizadas (aforador trapezoidal, tubular Samani, Tubular Shamel, Tubular Práctica). Tal aseveración determina que la estructura de aforador tubular resulta adecuada para el aforo de surcos, teniendo una error similar al aforador trapezoidal (2-5%). Si bien los resultados observados son satisfactorios se observa una tendencia que a caudales elevados el efecto de las curvaturas de líneas de flujo pueden influir en forma leve en los resultados esperados. Será necesario para la verificación de lo dicho anteriormente poner bajo análisis la estructura de aforo a caudal máximo de 2 a 5 L/s, ya que según los ensayos de campo que muestra la figura 3, solo se ha podido analizar caudales de 0,10 a 0,80 L/s. Por lo tanto es conveniente realizar posteriores ensayos en surcos de grandes dimensiones con pendientes mayores del 0,3%, de forma tal de verificar el funcionamiento del aforador a caudal máximo.



Figura 3: Ensayo de calibración a campo

CONCLUSIONES

Los resultados indican que mientras se mantenga el régimen crítico en la sección de control los dispositivos evaluados presentan un error menor del 5% en la medición del gasto o caudal, lo que se considera apropiado para su utilización en la evaluación de los métodos de riego por superficie, transformándose en una herramienta práctica para la evaluación del desempeño del riego por superficie. La ventaja que presenta respecto al resto de los dispositivos es que tiene poca pérdida de carga, son de fácil instalación y de construcción económica. Será necesario para la verificación de la precisión de todo el rango de caudales capaces de ser aforador por esta estructura, poner bajo análisis la misma a caudales de 2 a 5 L/s. Es recomendable la instalación de un dispositivo mecánico y/o electrónico para la medición del tirante de agua en la cámara de carga, ello permitirá dar más precisión a la lectura del tirante crítico y podrá detectar en las mediciones, pequeñas variaciones de caudal o gasto. Estos resultados nos alientan a esperar cambios cuali-cuantitativos en las prácticas específicas de manejo del riego, que conduzcan a un desarrollo respetuoso con el medio ambiente. Los mismos contribuyen a generar un espacio interdisciplinar e interinstitucional de trabajo, donde se coordinan y articulan acciones entre sectores públicos y privados con capacidades complementarias, para investigar, implementar y/o adaptar tecnologías agrícolas de manejo en los oasis de regadíos de Cuyo.

BILBIOGRAFÍA

- AMMARI, A. 2002. "Discharge measurement in rectangular channels using a portable cylinder". Unpublished M.Sc thesis, Univ. of Mosul, Mosul
- BOS, M.; REPLOGE J., CLEMMENS A. 1986. Aforadores de caudal para canales abiertos. Publication 38 ILRI. The Netherlands. 293 p.
- ISRAELSEN, O. Y HANSEN, V. 1965. Principios y aplicaciones del riego. Universidad del estado de Utah, Logan, Utah, Estados Unidos. 385 p.
- KINDSVATER, C.E; CARTER, R.W. 1957. Discharge characteristics of rectangular thin-plate weirs. J. Hydraulics Div. ASAE, 83(HY6), Paper 1453.
Ltd. London, UK.
Ltd. London, UK.
- MERCKLEY G. 2004. Irrigation Conveyance and control: Flow Measurement and Structure Design. Lectures Notes. Utah State University. 301 p.
- ROBINSON, A.R. AND CHAMBERLAIN, A.R. 1960. Trapezoidal flumes for open channel flow measurement. Trans. ASAE, vol 3, num 2, pag 120-124.
- SAMANI Z. AND MAGALLANEZ H., 1993. "Measuring Water in Trapezoidal Canals,," J. of Irr. and Drainage Eng., ASCE, Vol.119, No.1.
- SHAMEL I. AL-KADHI. 2006. A Mobile Device for Flow Measurement In Canals. Dept. of Water Resources, College of Engineering, University of Duhok.
- SHEN J. 1960. Discharge characteristics of triangular thin-plate weirs. Water supply Paper 1617B. US Department of the Interior, Geological Survey. US Government Printing Office, Washington D.C.

- SKOGERBOE, G.V.; HYATT, M.L.; ENGLAND, J.D AND JOHSON, J.R. 1967. Design and calibration of submerged open channel flow measurements structures. Utah Water Research Laboratory. Logan Utah.
- WHAL T. L., CLEMMENS A. J., ROPLOGE J. A., BOS M. G. 2005. "Simplified design of flumes and weirs", Journal of Irrigation and Drainage 54: 231-247
- WITHERS B. AND VIPOND S. 1974. "Irrigation Design and Practice", B.T. Batsford