

Sistema de aforo para sistemas de riego que utilizan mangueras colapsables

L. Bentancor, P. Durán & F. Pedocchi

To cite this article: L. Bentancor, P. Durán & F. Pedocchi (2022) Sistema de aforo para sistemas de riego que utilizan mangueras colapsables, Ribagua, 9:2, 41-52, DOI: [10.1080/23863781.2023.2218043](https://doi.org/10.1080/23863781.2023.2218043)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/23863781.2023.2218043>



© 2023 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group.



Published online: 01 Jun 2023.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 910



View related articles [↗](#)



View Crossmark data [↗](#)

Sistema de aforo para sistemas de riego que utilizan mangueras colapsables

L. Bentancor^a, P. Durán^a and F. Pedocchi^b

^aFacultad de Agronomía, Departamento de Suelos y Aguas, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay; ^bUniversidad de la República, Facultad de Ingeniería, Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), Montevideo, Uruguay

RESUMEN

Se presenta el desarrollo, calibración e implantación en campo de un sistema de aforo preciso y económico de medición de agua para riego. El sistema de aforo se puede instalar en tuberías presurizadas y permite medir el caudal instantáneo y el volumen integrado de agua de riego derivado a cada parcela del sistema de riego. Este sistema está compuesto por sensores, diseñados a partir del tubo de Pitot, para medir la velocidad del agua, y registradores electrónicos para almacenar y transmitir los datos recolectados. El sistema fue fabricado por Acequia Innova, España, y fue evaluado y calibrado en el laboratorio de hidráulica del Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), de la Universidad de la República, Uruguay. La calibración del sistema se realizó utilizando un perfilador de velocidad ultrasónico (UVP-duo, Met-Flow, Suiza). Durante la calibración se midieron perfiles de velocidad perpendicular en varias tuberías con diámetros utilizados en sistemas de riego superficial en Uruguay, diámetros nominales (DN) 110, 160, 200, 250 y 315 mm. El nuevo sistema de medición es adecuado para sistemas de riego con distribución de agua a través de mangueras colapsables y donde el uso de estructuras de medición a superficie libre no sería práctico.

GAUGING SYSTEM FOR IRRIGATION SYSTEMS THAT USE LAYFLAT HOSES

ABSTRACT

The development, calibration, and field deployment of a precise and economical gauging system for measuring water for irrigation is presented. The gauging system can be installed in pressurized pipes and allows for the measurement of instantaneous flowrate and integrated volume of irrigation water derived to each plot of the irrigation system. The gauging system is composed by low-cost sensors, designed after the Pitot tube, to measure the water velocity, and electronic recorders for storing and transmitting the collected data. The system was manufactured by Acequia Innova, Spain, and was evaluated and calibrated in the hydraulics laboratory of the Institute of Fluid Mechanics and Environmental Engineering (IMFIA), of the University of the Republic, Uruguay. System calibration was performed using an ultrasonic velocity profiler (UVP-duo, Met-Flow, Switzerland). During the calibration, two perpendicular velocity profiles were measured in several pipes with diameters commonly used in surface irrigation systems in Uruguay, nominal diameters (DN) 110, 160, 200, 250 and 315 mm. The new gauging system is particularly suitable for irrigation systems where water is distributed through layflat hoses, and where the use of free surface gauging structures would not be practical.

ARTICLE HISTORY

Received 12 August 2022
Revised 16 March 2023
Accepted 19 May 2023

PALABRAS CLAVES

Riego superficial;
caudalímetros; tubo Pitot;
sistema de aforo; tuberías

1. Introducción

En los sistemas de riego por superficie es necesario medir el caudal aplicado a las parcelas con exactitud. Esto permite asegurar que los volúmenes requeridos por los cultivos son efectivamente aplicados, y además permite la fiscalización de caudales entregados a cada usuario en sistemas de riego colectivos. Los registros de caudal suelen realizarse en las tomas, en la fuente de agua y en derivaciones, por ejemplo, desde el canal principal hacia canales secundarios y de éstos a las parcelas de riego.

En gran parte de los sistemas de riego por superficie los canales de distribución son excavados en tierra, y en muchos lugares del mundo, al igual que en Uruguay, los canales tienen pendientes longitudinales muy bajas. En estos sistemas el agua se mueve gracias a pequeños gradientes de cota o presión, con velocidades relativamente pequeñas, y es necesario que las pérdidas de carga asociadas a los sistemas de aforo deban ser lo más pequeñas posibles. Estas limitaciones en las pérdidas de carga admisibles y las bajas velocidades en el sistema, impiden el uso de dispositivos de aforo que utilizan

CONTACT L. Bentancor  lbentancor@fagro.edu.uy  Facultad de Agronomía, Departamento de Suelos y Aguas, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay

© 2023 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. The terms on which this article has been published allow the posting of the Accepted Manuscript in a repository by the author(s) or with their consent.

pérdidas de carga para estimar la velocidad o el caudal en la red de canales, tales como las placas orificio.

Si bien los aforadores de lámina libre se utilizan para medir caudales en los canales principales del sistema, en el Uruguay, así como en otros países los sistemas de riego por superficie utilizan mayoritariamente compuertas instaladas a la entrada de tubos de derivación desde los canales de distribución a las parcelas. Por otro lado, la generalización del uso de mangas de material plástico flexible hace que existan en el sistema de riego varios puntos en donde el agua fluye por tuberías a flujo lleno, lo que permite utilizar sistemas de aforo en estas tuberías, pero con el requisito de no introducir grandes pérdidas de carga.

En el mercado existen equipos para la medición de caudal en tuberías funcionando a sección llena, que cumplen estos requisitos, pudiéndose listar entre ellos caudalímetros de inserción que utilizan principios acústicos o electromagnéticos. Sin embargo, estos dispositivos tienen un alto costo que limita su aplicación en las derivaciones inferiores del sistema de riego, por lo que se hace necesario buscar alternativas con equivalente desempeño pero menor costo [1].

Los sistemas de riego colectivos en Uruguay carecen de un registro continuo de información sobre los caudales entregados a los regantes, redundando en el cobro por el servicio por hectárea regada. Con el interés de aplicar una tarifa equitativa de base volumétrica, la Sociedad de Fomento Rural de Colonia España (SOFORUCE), Bella Unión, Artigas, decide conformar un proyecto ante la Agencia Nacional de Investigación

e Innovación (ANII) con Facultad de Agronomía, donde se hizo uso de la tecnología descripta.

En busca de alternativas tecnológicas que atiendan las necesidades descritas en los párrafos anteriores, se desarrolló un sensor basado en el tubo Pitot por parte de Acequia Innova en el marco del Proyecto: ‘Telecontrol de un sistema de riego por gravedad e implementación de tarifa volumétrica para el cobro de agua,’ Financiado por ANII- Alianzas 2018–2021 (REF: ALI_1_217_1_137210). En la [Figura 1](#) se presenta el diseño propuesto, que sobre un cilindro perpendicular al flujo ubica una toma enfrentando al flujo y otra perpendicular al mismo.

El dispositivo desarrollado cumple con: tener un diseño sencillo, robusto, de fácil reparación y fundamentalmente ser de bajo costo. El sensor Pitot desarrollado es además de fácil colocación, requiriendo solamente la realización de un orificio en la pared de la tubería de derivación para permitir el pasaje del sensor. Está construido con materiales de uso regular en instalaciones sanitarias. Su cuerpo está construido con un tubo de cobre, una salida de tanque en bronce para el ajuste del sensor al tubo y aros de goma cónicas que se presan sobre las paredes de la tubería impidiendo filtraciones.

El sensor Pitot desarrollado es particularmente adecuado para ser utilizado en tuberías con baja carga. Por ejemplo, en las tuberías utilizadas en las de derivaciones a las parcelas mediante compuertas (tomas-granja) ([Figura 2](#)). El sensor desarrollado resulta particularmente conveniente cuando se realiza el riego del cultivo

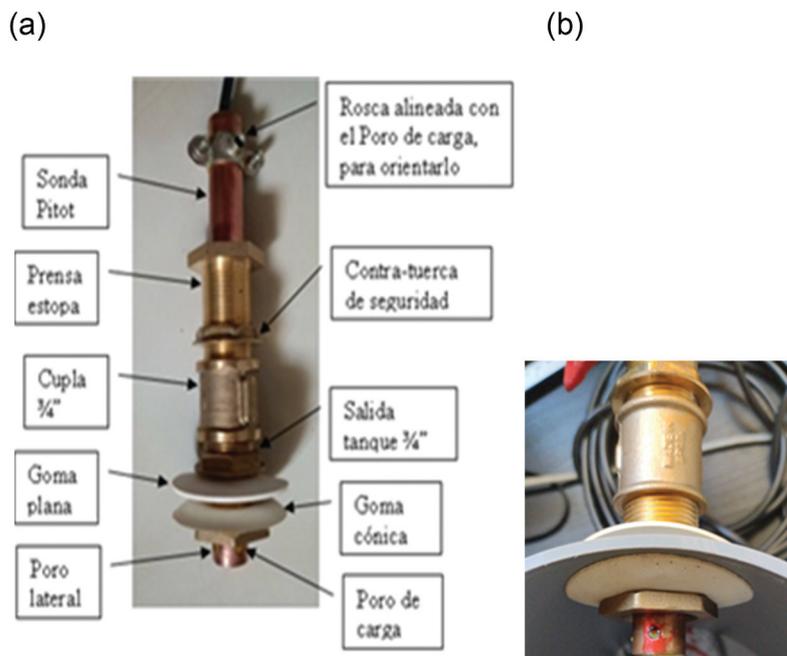


Figura 1. Sensor Pitot indicando sus partes principales (a), detalle del sensor colocado en la tubería (b).

mediante mangas, donde no es posible el uso de aforadores de lámina libre. Por otro lado, la experiencia ha mostrado que no presenta dificultades de obstrucción con aguas que contienen elementos en suspensión que puedan detener o alterar el registro.

Como se presenta en este artículo el nuevo sensor mostro ser adecuado para el registro de la velocidad del agua en un punto de las tuberías utilizadas en los sistemas de distribución de agua de riego. A partir de este registro de velocidad, las características de la tubería (diámetro y rugosidad) es posible calcular con precisión el caudal circulante en los distintos puntos de un sistema de riego.

El tubo Pitot fue desarrollado por el Ingeniero francés Henri Pitot en 1732 y hoy es de uso común en la industria gracias a su bajo costo, y simpleza de operación y mantenimiento [2].

El tubo Pitot tiene dos orificios, uno de ellos enfrente al flujo de agua, que mide la carga total y otro perpendicular a éste, paralelo al flujo de agua que mide la carga piezométrica. La diferencia de carga entre las tomas es registrada como una diferencia de presión Δp , que corresponde al término cinético de la carga [1]. Tenemos entonces que

$$V_p = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (1)$$

donde Δp es la diferencia de presión entre las tomas del Pitot, ρ es la densidad del agua, y V_p es la velocidad del agua frente a la toma frontal del Pitot.



Figura 2. Compuerta y tubo de alimentación con Pitot instalado.

Para obtener el caudal circulante en una tubería a partir de las mediciones puntuales como las que realiza el Pitot, es necesario repetir la medida de velocidad a varias distancias de la pared sobre un diámetro de la tubería, e integrarlas para obtener la velocidad media. Sin embargo, si se asume la forma del perfil de velocidades dentro de la tubería, es posible vincular la velocidad puntual registrada por el Pitot a una distancia radial dada dentro de la tubería, con la velocidad media en la sección de la tubería. Requiriéndose para esto la calibración del sensor para las condiciones particulares de trabajo [3–6].

La Ecuación (1) no considera la existencia de pérdidas de carga entre las tomas del Pitot, lo que es razonable para un tubo Pitot diseñado con criterios aerodinámicos pero esta hipótesis no se verifica para el diseño sencillo que proponemos. Para contemplar este aspecto se introduce un coeficiente de velocidad C_V , el cual depende de la geometría del tubo Pitot y eventualmente de la posición de éste dentro de la tubería, además de poder depender de las condiciones de flujo, pudiendo depender del número de Reynolds [6].

El vínculo entre el salto de presión entre las tomas y la velocidad se expresa entonces como

$$V_p = C_V \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (2)$$

El valor de C_V suele encontrarse entre 0.6 y 0.8 [7].

En las aplicaciones que nos interesan aquí el flujo de agua puede considerarse turbulento y por tanto el perfil de velocidades dentro de la tubería de diámetro D puede aproximarse con una ley de potencia [1]

$$V = V_0 \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/6} \quad (3)$$

donde V_0 es la velocidad en el centro de la tubería, r es el punto de medición de la velocidad, $R = D/2$ es el radio de la tubería, V es la velocidad en el punto de medición, y el exponente $1/6$ es una buena aproximación para régimen de flujo turbulento rugoso.

Esta relación permite ver que la velocidad para flujo turbulento rugoso totalmente desarrollado en $r = 0.76 R$ es igual a la velocidad media en la tubería. Por lo que si se utiliza una inserción del Pitot de $0.76 R$ el valor de velocidad obtenido con la Ecuación (3) coincidiría con la velocidad media V_m .

Posibles desviaciones de esta situación ideal se contemplan introduciendo un coeficiente de forma C_A . Finalmente, el caudal Q estimado a partir de las mediciones del tubo Pitot queda dado por

$$Q = C_A C_V \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (4)$$

donde $\pi D^2/4$ es el área transversal de la tubería

Definiendo un coeficiente de descarga C_D que engloba todos los coeficientes numéricos introducidos, la Ecuación (4) puede escribirse en forma general como

$$Q = C_D D^2 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (5)$$

Los experimentos muestran que esta ecuación debe ser generalizada para capturar correctamente los datos, por lo que se libera el exponente que afecta al diámetro de la tubería [6,y 8]

$$Q = C_D D^\alpha \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (6)$$

donde los valores numéricos de α y C_D se ajustarán en base a experimentos para el Pitot propuesto, considerando el porcentaje de inserción, el diámetro y material de la tubería.

2. Materiales y métodos

2.1. Sensor Pitot y circuito de registro y almacenamiento de datos

El diseño y los componentes del sensor desarrollado pueden verse en la Figura 1. En la implementación desarrollada por Acequia Innova, la diferencia de presión entre las dos tomas de presión del Pitot se realiza con un sensor de presión diferencial capaz de medir entre 0 a 40 y 0 a 60 cm de columna de agua, con un error máximo del 2,5% (1,0 cm y 1,5 cm respectivamente). Se trata de sensores piezo-resistivos, compensados por temperatura (de 0°C a + 85°C), con respuesta lineal en ese rango.

La señal de voltaje producida por el sensor de presión es registrada cada 10s por el circuito del equipo SP-Durcas (Acequia Innova, España). La configuración del SP-Durcas incluye la ecuación de descarga para el diámetro del caño de la compuerta, lo que permite calcular el caudal instantáneo. Se calcula el volumen transitado en los 10 segundos y se va acumulando. La frecuencia de grabación del volumen acumulado es configurable en el rango de 1 minuto a 24 horas (usualmente se fija en 15 minutos cuando hay caudal y 24 horas sin riego). Este volumen acumulado se registra a la frecuencia establecida en el datalogger interno. Este tiene memoria permanente ROM (imborrable aún en caso de producirse un fallo eléctrico en el sistema), que opera en forma circular (una vez llegado a la posición final de la misma comienza a grabar en la posición 1), con capacidad para 3270 registros.

El sistema trabaja 24 horas al día. La diferencia entre dos registros de volumen acumulado dividida el tiempo transcurrido entre dos registros permite obtener el caudal medio del periodo. El circuito de registro y almacenamiento de datos cuenta con un panel de control portátil con botonera y pantalla (Figura 3). Para abaratar el costo de equipamiento en el caso de sistemas con múltiples puntos de medición, se ha suprimido el display y la botonera en cada SP-Durcas (equipos ciegos) utilizándose una consola portátil (MDE-MTX Transfer, Acequia Innova) que permite configurarlo, operarlo y descargar datos. También cuenta con un módem para transmitir datos a distancia y visualizar los datos de caudal y volumen registrado en una base de datos con interfase Web (Figura 4).

2.2. Calibración

Los nuevos sensores Pitot fueron calibrados en el laboratorio del Instituto de Mecánica de los Fluidos

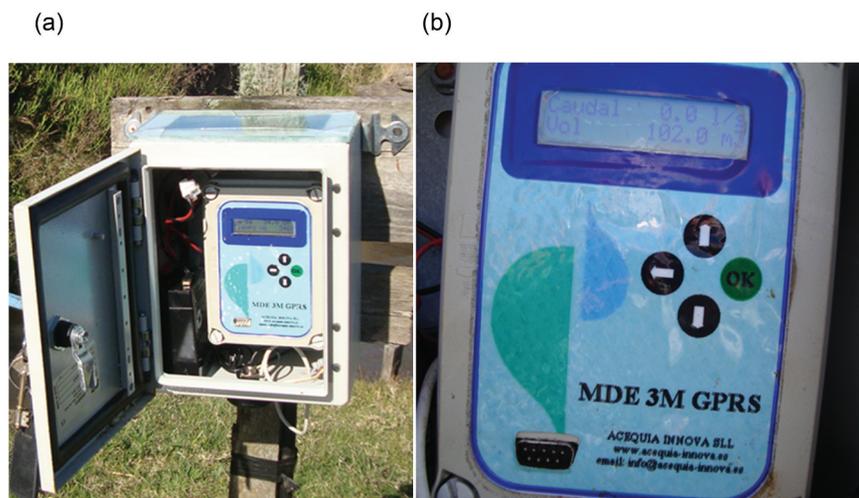


Figura 3. Vista del datalogger con pantalla instalado (a), detalle de la pantalla y botonera (b).

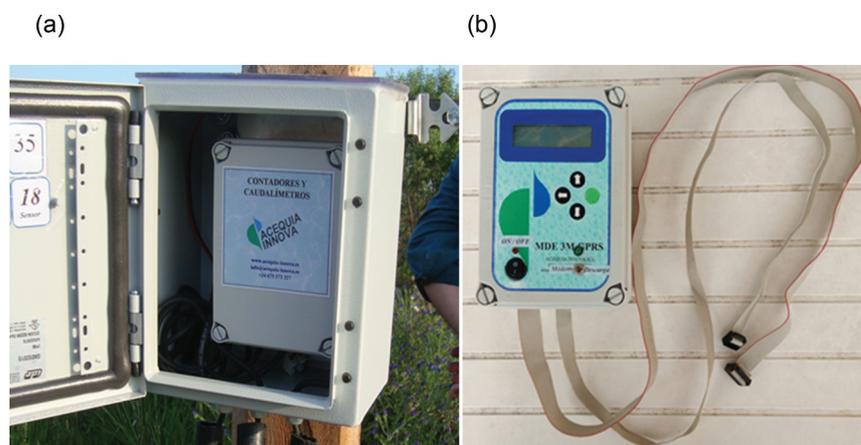


Figura 4. Vista del equipo ciego (a), detalle de la consola portátil MDE-MTX Transfer para descarga de datos (b).

e Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería (IMFIA), Universidad de la República, Uruguay (Figura 5). Con este fin, en uno de los canales del laboratorio, se construyó un tabique donde se conectaron tuberías de PVC tipo sanitario clase 20 y 25, en 5 diámetros nominales (DN) 110, 160, 200, 250 y 315 mm. Estas tuberías son las mismas que se utilizan en los sistemas de distribución de agua de riego en Uruguay. Las características de las tuberías ensayadas se listan en la Tabla 1.

2.2.1. Perfilador de velocidades y configuración experimental

Para tener una medición de caudal contra la que calibrar el sistema de medición desarrollado, se utilizó un perfilador de velocidades ultrasónico UVP-duo, fabricado por Met-Flow, Suiza. El UVP permite registrar la proyección de la velocidad del agua sobre el rayo acústico de sus sensores [9]. Para obtener una medición precisa de caudal en la tubería se colocaron dos sensores formando un ángulo de 60° con el eje de la tubería, a 90°

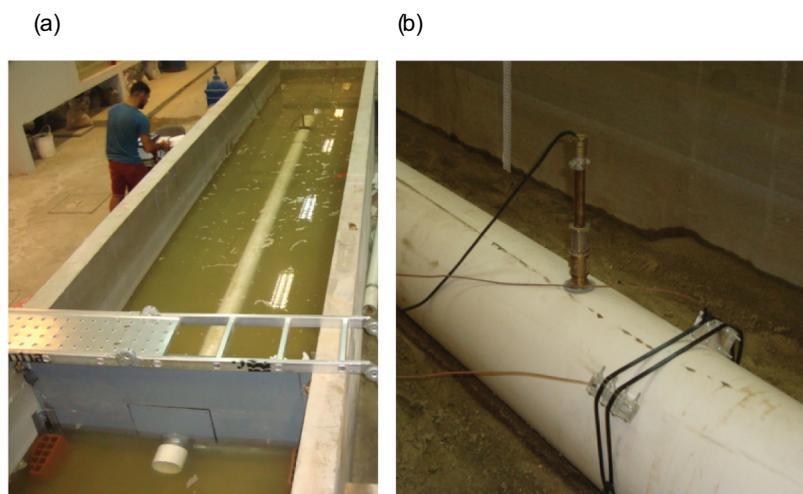


Figura 5. Canal utilizado durante los ensayos (a), tubería de PVC con el Pitot insertado y los sensores del perfilador de velocidades ultrasónico (b).

Tabla 1. Principales características geométricas de los tubos de PVC ensayadas.

Diámetro nominal tubería PVC (mm)	Espesor de pared (mm)	Diámetro interno tubería (mm)	Área de la sección interna (m ²)
110	3,2	103,6	0,008430
160	3,2	153,6	0,018530
200	3,9	192,2	0,029013
250	6,2	237,6	0,044339
315	6,2	302,6	0,071917

Tabla 2. Detalles de la inserción del Pitot para cada diámetro de tubería ensayado.

Diámetro nominal (mm)	Inserción (mm)	Diám int (mm)	% de inserción
110	12.4	103.6	12
160	18.4	153.6	12
200	23.1	192.2	12
250	28.5	237.6	12
315	36.3	302.6	12

uno del otro, de forma de tener perfiles de velocidad cubriendo todo el diámetro en dos rectas perpendiculares dentro de la tubería (Figura 5).

Para fijar los sensores de UVP se realizó una pequeña perforación en la pared de la tubería y se posicionó cada uno de los sensores utilizando una pieza de acrílico especialmente preparada para asegurar el ángulo entre el sensor y la pared de la tubería (Figura 5 b). Los sensores del UVP sobresalían menos de 4 mm hacia el interior de la tubería durante los ensayos.

Como la dirección media del flujo es colineal con el eje de la tubería, la velocidad radial registrada por cada sensor del UVP puede ser convertida a una velocidad longitudinal tomando en cuenta el ángulo de proyección. Los dos perfiles de velocidades medias fueron integrados obteniéndose una velocidad media en la sección y el caudal circulante para cada uno de los experimentos.

Como puede verse en la Figura 5, la sección de medición donde se colocó el UVP y el Pitot se encontraba 4,5 m aguas abajo de la entrada de la tubería, permitiendo un desarrollo completo del flujo dentro de la misma. La inserción del tubo Pitot fue en todos los casos de 12% del diámetro interno D (Tabla 2). En todos los casos se verificó que las tuberías fluyeran llenas y que no existieran burbujas de aire en la zona de medición.

Las mediciones con UVP y con Pitot se realizaron en forma simultánea y para cada diámetro de tubería se realizaron entre 7 y 11 mediciones, utilizando caudales desde 1,5 hasta 64 l/s. Para obtener estimaciones de la velocidad media se hicieron registros de velocidad con UVP durante 2 minutos y con Pitot, durante 5 minutos, tomando medidas cada 30 segundos de duración.

3. Resultados

Se realizaron 44 experimentos con la configuración descrita, los resultados se resumen en la Tabla 3.

Como se presentó en la Sección 1 el caudal puede ser estimado a partir del salto de presión registrado por el Pitot utilizando la Ecuación (6). Vale la pena recordar que C_D es esperable que presente dependencia del número de Reynolds. Además, C_D podría ser diferente para distinto diámetros de tubería ya que la sección transversal del Pitot

puede ser significativa respecto a la sección de la tubería para los diámetros menores. De forma de minimizar estos efectos se procedió a analizar los diámetros mayores (diámetros nominales 200, 250 y 315 mm) trabajando con los caudales mayores. Estos experimentos se destacan en la Tabla 3.

Despejando en la Ecuación (6) se obtiene

$$\frac{Q}{\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}} = C_D D^\alpha \quad (7)$$

La gráfica de $Q(\rho/2\Delta p)^{1/2}$ versus diámetro interno de la tubería D , se presenta en la Figura 6. Haciendo una regresión lineal se encuentra con un 99% de confianza que el exponente $\alpha = 2.88$, para $Q(\rho/2\Delta p)^{1/2}$ medido en m^2 y D en m.

Entonces, el valor de C_D se expresa a partir un valor base C_{D0} que debe ser corregido por efecto del bloqueo al flujo por el Pitot, para los diámetros menores, y por el efecto de la viscosidad del agua (número de Reynolds) para diámetros y velocidades menores. Se obtiene entonces

$$C_D = k_1(D)k_2(\text{Re})C_{D0} \quad (8)$$

donde $C_{D0} = 1,55$ es una constante; $k_1(D)$ contempla la obstrucción que provoca la inserción del Pitot y es dependiente del diámetro de la tubería; y $k_2(\text{Re})$ contempla los efectos viscosos. Tanto k_1 como k_2 deben ser mayores o iguales a 1 y converger a 1 para los grandes diámetros y los valores altos del número de Reynolds, respectivamente.

Los valores del coeficiente k_1 se obtuvieron de los valores experimentales registrados para los diámetros de tubería menores (diámetros nominales 110 y 160 mm), pero con números de Re altos. Los valores obtenidos para k_1 a partir de estos experimentos se reporta en la Tabla 4.

La expresión para el coeficiente $k_2(\text{Re})$ se obtiene graficando todos los valores de caudal y presión disponibles ya corregidos por $k_1 C_{D0}$. Los resultados se presentan en la Figura 7, y como puede verse pueden ser representados razonablemente para todos los diámetros por una expresión sencilla.

$$k_2(\text{Re}) = 1 + \frac{3 \cdot 10^4}{\text{Re}} \quad (9)$$

En este caso el número de Reynolds se calcula a partir de las mediciones del Pitot, como:

$$\text{Re} = \frac{D}{\nu} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (10)$$

Utilizando estos coeficientes se obtiene entonces una curva de calibración que permite convertir las mediciones de presión realizadas con el Pitot a caudales, para los

Tabla 3. Listado de experimentos indicando condiciones de ensayo: diámetro nominal de la tubería, temperatura del agua (°C), fecha, velocidad de giro de la bomba (RPM), caudal estimado utilizando el UVP (l/s), salto de presión registrado por el Pitot (cm de columna de agua).

	Fecha	Bomba (RPM)	Q UVP (l/s)	Δp (cm c. a.)	
DN 110, 20°C	10/02/2020	500	1,70	0,46	
	10/02/2020	510	2,41	1,19	
	10/02/2020	520	2,47	1,68	
	10/02/2020	530	2,52	1,38	
	13/02/2020	490	2,51	1,14	
	13/02/2020	500	5,64	6,63	
	13/02/2020	510	8,80	17,84	
	13/02/2020	515	9,36	19,20	
	13/02/2020	515	11,25	28,73	
	13/02/2020	520	12,51	41,75	
	13/02/2020	525	13,94	49,80	
	DN 160, 22°C	14/02/2020	500	7,52	0,88
		14/02/2020	510	12,51	3,95
14/02/2020		520	15,80	8,54	
14/02/2020		530	19,82	13,55	
14/02/2020		540	22,98	20,64	
14/02/2020		550	28,09	29,05	
14/02/2020		560	29,91	31,97	
14/02/2020		570	30,19	35,15	
14/02/2020		580	30,88	37,72	
14/02/2020		590	32,42	37,84	
DN 200, 21°C	17/02/2020	520	18,64	4,95	
	18/02/2020	535	25,64	10,77	
	18/02/2020	550	31,97	19,29	
	18/02/2020	570	34,95	23,04	
	18/02/2020	600	38,29	29,26	
	18/02/2020	650	45,85	39,20	
	18/02/2020	700	50,87	47,14	
DN 250, 21°C	19/02/2020	520	21,07	1,60	
	19/02/2020	530	25,77	3,26	
	19/02/2020	540	31,10	5,13	
	19/02/2020	550	33,30	6,38	
	19/02/2020	570	34,92	8,59	
	19/02/2020	590	39,14	9,29	
	19/02/2020	620	42,29	10,17	
	19/02/2020	640	44,22	12,25	
	19/02/2020	690	48,94	14,03	
DN 315, 20°C	28/02/2020	550	33,56	0,86	
	28/02/2020	600	39,97	1,98	
	28/02/2020	650	44,33	3,86	
	28/02/2020	700	48,81	3,99	
	28/02/2020	750	53,09	5,27	
	28/02/2020	800	61,05	6,26	
	28/02/2020	850	66,87	8,04	

diferentes diámetros y condiciones de flujo. En la [Figura 8](#) puede verse el resultado de calcular el caudal por esta metodología contra el caudal medido utilizando el UVP. El coeficiente de correlación en este caso fue de 0.99 y el error cuadrático medio de $4,95 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$.

4. Discusión

4.1. Expresión simplificada

En algunas aplicaciones puede que errores levemente mayores sean tolerables, particularmente para los caudales más bajos. En estos casos puede omitirse la

corrección por número de Reynolds y obtener una expresión solamente en términos de C_{D0} y k_1 .

$$C_D = k_1(D)C_{D0} \quad (11)$$

En este caso se encuentra un valor de C_{D0} levemente mayor, $C_{D0} = 1.76$ es el que permite el mejor ajuste manteniendo los valores de k_1 . El coeficiente de correlación que se obtiene en este caso es de 0.98 y el error cuadrático medio de $6,9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ([Figura 9](#)). Esta expresión tiene la ventaja de que el caudal puede ser encontrado para cada diámetro simplemente multiplicando la raíz cuadrada del salto de presión registrado por el Pitot por una constante, lo que los hace fácilmente programable en el datalogger.

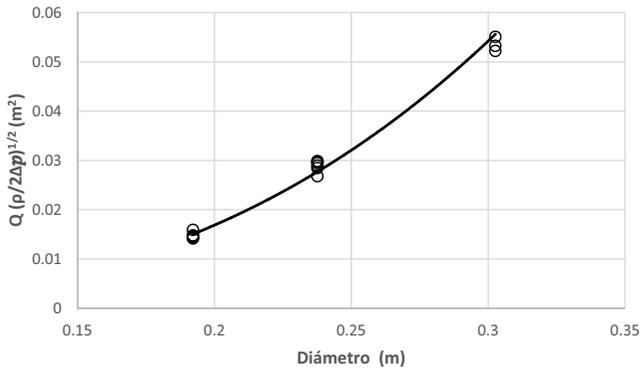


Figura 6. Relación entre diámetro interno de la tubería y el caudal sobre el salto de presión registrada por el Pitot, con un coeficiente de determinación de 0,99.

Tabla 4. Valores determinados para el coeficiente k_1 .

DN (mm)	k_1
110	1,65
160	1,51
200	1,00
250	1,00
315	1,00

4.2. Errores

Los errores relativos asociados a cada una de las estimaciones de caudal usando la Ecuación (8), que considera efectos del número de Reynolds, o la Ecuación (11), simplificada se presentan en las Figuras 10 y 11 respectivamente. En ellas el error se expresa como función del salto de presión registrado por el Pitot desagregando por diámetro nominal.

Para la Ecuación (8), se observa que, al aumentar los valores del salto de presión, el error en la determinación del caudal disminuye. Para valores de salto de presión mayores a 0,7 m/s el error relativo se encuentra en general por debajo del 10% sin presentar una tendencia

determinada. Este error se encuentra dentro de lo razonable en aplicaciones de riego por superficie. Por debajo de 0,7 m/s el error relativo aumenta pudiendo superar el 30%. De todas formas, estos saltos de presión se darían solamente en el caso que se colocara una tubería de gran diámetro en la entrada de una parcela pequeña, lo que además de tener un costo de tubería mayor conllevaría a errores mayores en las estimaciones de caudal. Los errores entonces se pueden minimizar colocando tuberías de distribución acordes a los caudales esperados en la temporada de riego.

Por otro lado, comparando las Figuras 10 y 11 se encuentra, como era de esperar, que los errores son menores en el caso que se incluye la corrección por el número de Reynolds en lugar de utilizar un coeficiente fijo para cada diámetro. Sin embargo, el aumento de los errores es moderado pudiéndose utilizar la expresión simplificada con errores razonables si los saltos de presión son mayores a 1.00 m/s.

4.3. Recomendaciones

Para un adecuado funcionamiento del Pitot hay que tener mucha precaución en la correcta inserción para cada uno de los diámetros de los tubos que se use.

La tubería siempre debe estar en carga o sea a ‘tubo lleno,’ para ello hay que respetar los diámetros recomendados para medir con precisión los caudales.

Se deben seleccionar las tuberías a instalar de acuerdo con el tamaño de la parcela, de forme que en régimen las velocidades de flujo en la tubería estén por encima de 0,7 m/s.

La infraestructura de derivación de agua a las chacras debe adecuarse para evitar turbulencias que afecten la medición con Pitots (burbujas y vórtices) y asegurar que los tubos de las compuertas trabajen llenos (en carga) ya

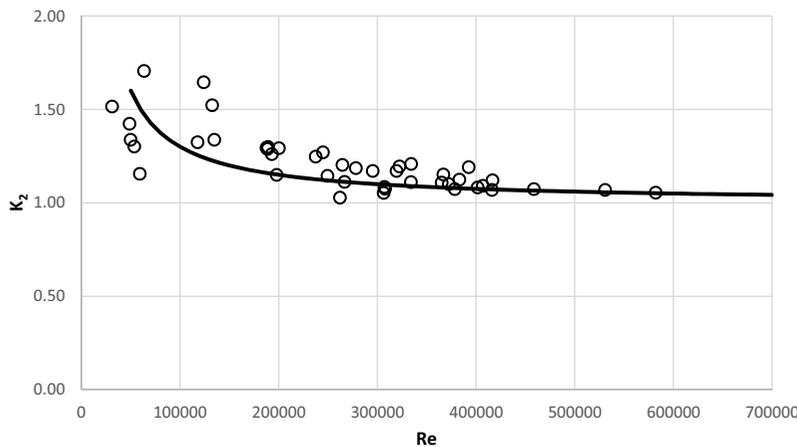


Figura 7. Valores experimentales de k_2 en función del Re. La línea negra corresponde al ajuste dado por la Ecuación (9).

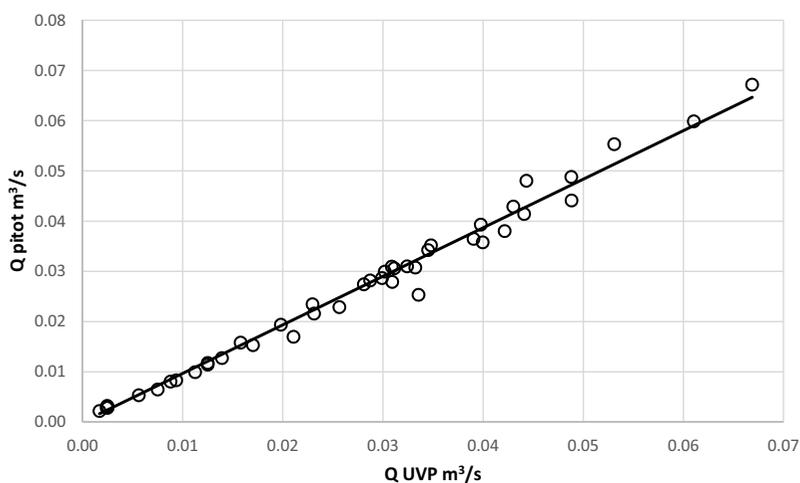


Figura 8. Comparación de valores de caudal calculados con la Ecuación (8) con los caudales medidos por el UVP.

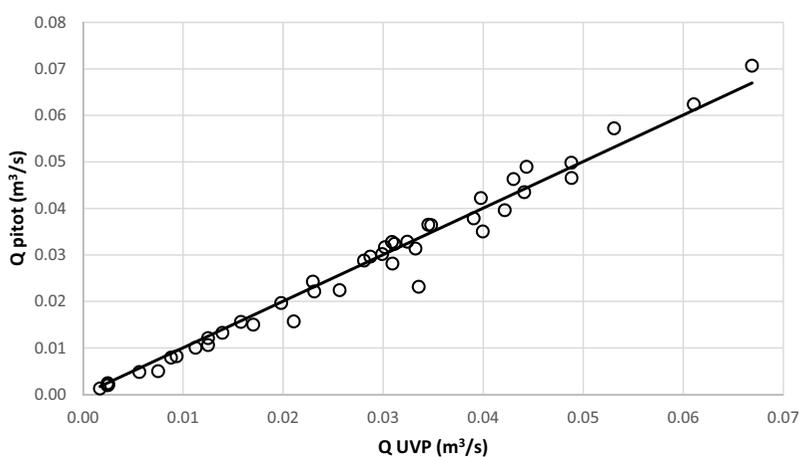


Figura 9. Comparación de valores de caudal calculados con la Ecuación (11) que no considera efectos del Re , con los caudales medidos por el UVP.

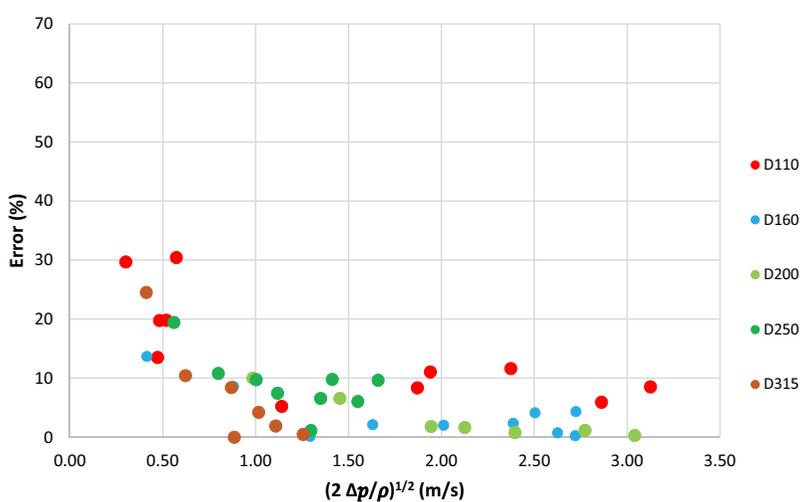


Figura 10. Error relativo en %, para distintos saltos de presión registrados por el Pitot utilizando la Ecuación (8) para el cálculo de C_D . Los diámetros nominales se distinguen por el color indicado en la leyenda.

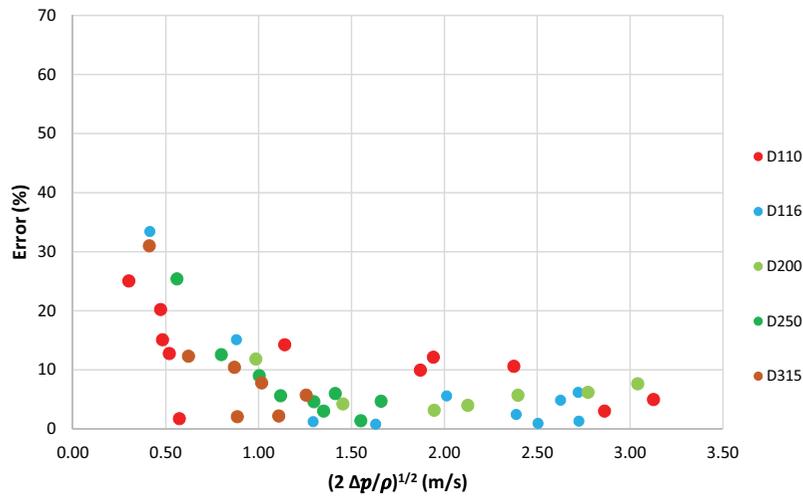


Figura 11. Error relativo en %, para distintos saltos de presión registrados por el Pitot utilizando la Ecuación (11) . Los diámetros nominales se distinguen por el color indicado en la leyenda.

que esto es condición indispensable para la medición con Pitots.

5. Aplicación a un sistema de riego por gravedad de caña de azúcar

La metodología descrita en este trabajo se aplicó en el sistema de riego colectivo de Colonia España, Bella Unión, Artigas, con el objetivo de obtener el volumen individual entregado a cada regante. Para ello se instalaron equipos de medición en la mayoría de las compuertas de riego en caña de azúcar, en operación durante las temporadas 2018/19, 2019/20, 2020/21 (Figura 12 y Figura 13).

Se instalaron equipos de medición estratégicamente ubicados en el sistema de riego, de forma de obtener lecturas de alta frecuencia de la carga o altura de agua en las compuertas de derivación, las variaciones de volumen en los almacenamientos intermedios y en su caso,



Figura 12. Pitot inserto en tubería aguas abajo de una compuerta en riego por canales en caña de azúcar.



Figura 13. Pitot inserto en tubo a la salida de una compuerta en riego con mangas en caña de azúcar.

directamente los caudales derivados a las chacras. Estos valores se registran y graban en una base de datos en un alojamiento Web.

En la temporada 2020–21 la superficie total de riego fue de 707 ha, de las cuales fueron implementadas 625 ha (88% del área de riego) que corresponde a 68 compuestas, que registraron caudales en parcelas con áreas de riego entre 3,9 y 34 has (Figura 14). Las 31 compuertas no medidas, por la pequeña superficie que regaron, no justificaban el gasto en equipos, por lo que se estimó su consumo de agua en función de la lámina bruta que el regante utilizó en las compuertas grandes. Se entendió que la lámina bruta era un parámetro que mejor describe la modalidad de riego del usuario (la eficiencia de aplicación).

En las compuertas instrumentadas, se encontraron problemas de diversa índole que fueron debidamente solucionados, entre los que se pueden mencionar: tubos de descarga no llenos por baja carga, burbujas

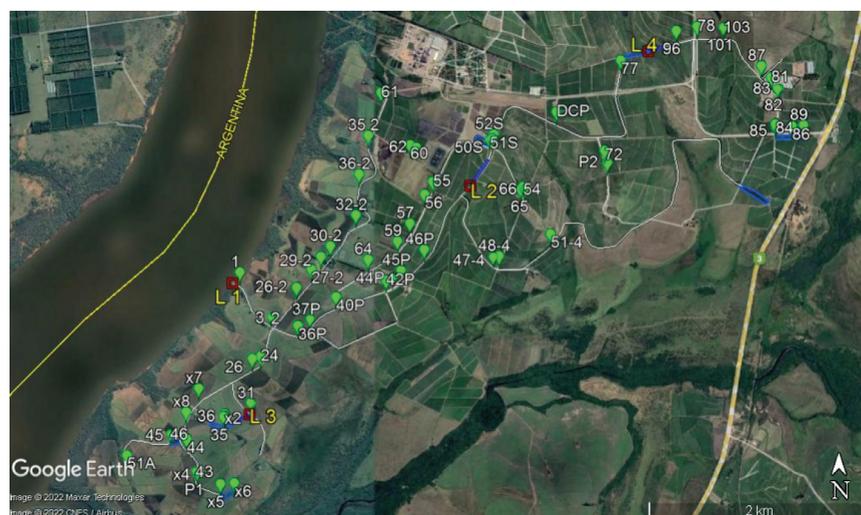


Figura 14. Sistema de riego de SOFORUCE, numerados los puntos de instalación de los Pitots y los levantes.

o vórtices que no permiten tomar una medida correcta del sensor. Problemas de hardware y o software por mala conexión o roturas de sensor. Debe mencionarse también que numerosos equipos entraron en funcionamiento en fechas posteriores al inicio de riego.

En el caso de compuertas con faltante de registros de los riegos, sea por inicio tardía o bien por alguna interrupción de la medición, se estimaron los volúmenes faltantes en función del volumen medido en los días registrados. Para el caso de las compuertas no instrumentadas, se calculó la lámina bruta promedio de todas las compuertas asignadas a un regante que medían y en base a la superficie regada por las compuertas no medidas, se calcularon (estimaron) sus volúmenes de riego.

El equipamiento instalado en el sistema de riego, en el transcurso de los años, 2018 a 2021, ha permitido brindar información muy valiosa al sistema a la hora de aclarar diferendos entre regantes, reclamos por mala calidad del servicio, detectar uso abusivo de determinadas compuertas por parte de los usuarios.

El sistema de riego de la Colonia España se constituye en el primero de los sistemas por gravedad del Uruguay con las herramientas necesarias para optimizar la operación y permitir la aplicación de una tarifa volumétrica en el país y uno de los primeros a nivel regional y mundial.

6. Conclusiones

Desde el punto de vista práctico el equipo Pitot es sencillo de instalar y tiene un costo inferior comparándolo con otros equipos de inserción.

Los ensayos de calibración de estos dispositivos en el laboratorio de hidráulica del IMFIA de la Facultad de Ingeniería permitieron ajustar los coeficientes de descarga para los 5 diámetros usualmente utilizados en este tipo de sistema de riego.

Los sensores Pitot utilizados para la medición de la velocidad dentro de los tubos para los diámetros ensayados, se han mostrado como una tecnología factible de ser utilizados para este fin, considerando un límite de operatividad de 0,7 m/s.

La infraestructura de derivación de agua a las chacras debe adecuarse en algunos casos para evitar turbulencias que afecten la medición con Pitots (burbujas y vórtices) y asegurar que los tubos de las compuertas trabajen llenos (en carga) ya que esto es condición indispensable para la medición con Pitots.

Se debe adecuar el diámetro de los tubos de salida de las compuertas buscando un equilibrio entre la seguridad de proporcionar el caudal requerido por los regantes y la velocidad mínima requerida para accionar los sensores Pitot.

Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the author(s).

References

- [1] Baker R. Fluid mechanics essentials. In: Flow measurement Handbook: industrial designs, operating principles, performance, and applications. Cambridge: Cambridge University Press; 2016. p. 27–51.
- [2] Splay R, Freeman Adane K, Sanders R, et al. The effect to flow Reynolds number flows on Pitot tube

- measurements. *Flow Meas Instrum* N°. [2015](#);45:247–254.
- [3] Baker RC. *Flow measurement handbook*. New York, USA: University of Cambridge; [2000](#). p. 525.
- [4] De Las Heras JS. *Fluidos, bombas e instalaciones hidráulicas*. Universitat Politècnica de Catalunya. Oficina de Publicacions Acadèmiques Digitals de la UPC. [2011](#). 417.
- [5] Pochwala S, Kabacinsky M, Pspolita J. Influence of typical flow disturbing elements on the flow rate in selected averaging Pitot tubes. *Task Quarterly* 16 N° 3–4. [2012](#). 219–228.
- [6] Vinod V, Chandran T, Padmakumar G, et al. Calibration of an averaging Pitot tube by numerical simulations. *Flow Meas Instrum* N°. [2012](#). 24:26–28.
- [7] Pochwala S, Pospolita J. Analysis of applicability of flow averaging Pitot tubes in the areas of flow disturbance. *Metrol Meas Syst*. [2016](#);XXIII(1):71–84.
- [8] Etemad SG, Thibault J, Hashemabadic SH. Calculation of the Pitot tube correction factor for Newtonian and non-Newtonian fluids. *ISA Trans*. [2003](#);42(4):505–512.
- [9] Lemmin U, Rolland T. Acoustic velocity profiler for laboratory and field studies. *J Hydraulic Eng*. [1997](#);123(12):1089–1098.