



Advances in Water in Agrosience

Flume calibration on irrigated systems by Video Image Processing and Bayesian Inference

Calibración de canales aforadores en sistemas irrigados mediante el procesamiento de imágenes de video y la inferencia bayesiana

Calibração de calhas da vazão em sistemas irrigados por Processamento de Imagens de Vídeo e Inferência Bayesiana

Navas, R. ¹; Monetta, D. ¹; Roel, A. ²; Blanco, N. ¹; Gil, A. ³, Gamazo, P. ¹

¹Universidad de la República, CENUR - Litoral Norte, Departamento del Agua, Salto, Uruguay

²Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Treinta y Tres, Uruguay

³Universidad Central de Venezuela, Departamento de Ingeniería Hidrometeorológica, Caracas, Venezuela

Editor

Ángela Gorgoglione 
Universidad de la República,
Montevideo, Uruguay

Received 22 Apr 2023

Accepted 17 Aug 2023

Published 06 Feb 2024

Correspondence

Rafael Navas
rafaelnvas23@gmail.com

Abstract

Rice is a crop that requires a large amount of water throughout its production cycle to ensure a good yield, resulting in higher water consumption compared to other crops. In Uruguay, about 160,000 ha/year are planted, requiring about 1,760 hm³/year of water, with a very high international average productivity of 9,000 kg/ha. Irrigation is generally carried out by surface/flooding, with water passing through dug channels where gates are used to regulate the flow, and in some cases measurement devices are installed. Increasing pressure on water resources makes it necessary to increase knowledge of water use at the farm level. Flumes are an opportunity in this sense; however, they require calibration and adjustment through gauging, which are generally omitted due to their high cost and complexity. In this work, an economic method for the calibration of flumes through image video processing is proposed. The method uses the RlveR software (<https://riverdischarge.blogspot.com/>) for the video image processing, and the BaRatinAGE software to establish the stage-discharge relationship through Bayesian inference. A Surface Velocity Radar and an Acoustic Doppler Velocity Meter are used as reference sensors. The methodology is tested on a cutthroat flume. The experiment was conducted at a rice farm in northern Uruguay. The results indicate that flumes can be easily calibrated by video image processing and uncertainty can be quantified through Bayesian inference. An advantage of the proposed method is that it uses free software that can be easily applied in small farms.

Keywords: flume calibration, RlveR, BaRatinAge

Resumen

El arroz es un cultivo que requiere gran cantidad de agua a lo largo de todo su ciclo productivo para garantizar un buen rendimiento, lo que lleva a un gasto de agua mayor en comparación con otros cultivos. Uruguay siembra alrededor de 160.000 ha/año, lo que demanda unos 1.760 hm³/año de agua, obteniendo valores promedio de productividad muy altos a nivel internacional de 9.000 kg/ha. El riego por lo general se hace por inundación, conduciendo el agua a través de canales excavados donde se utilizan compuertas para la regulación del agua y, en algunos pocos casos, se instalan



Navas R, Monetta D, Roel A, Blanco N, Gil A, Gamazo P. Calibración de canales aforadores en sistemas irrigados mediante el procesamiento de imágenes de video y la inferencia bayesiana. Agrocienza Uruguay [Internet]. 2023 [cited dd mmm yyyy];27(NE1):e1182. Doi: 10.31285/AGRO.27.1182.

dispositivos para su medición. La creciente presión que existe sobre el recurso agua genera la necesidad de ampliar el conocimiento de los consumos de agua a nivel de chacras. Los canales aforadores son una oportunidad en este sentido, pero, sin embargo, requieren calibración y ajuste con mediciones, lo que generalmente es omitido por su alto costo y complejidad. Este trabajo propone una metodología económica para la calibración de canales aforadores mediante el procesamiento de imágenes de video. La metodología utiliza el software RlveR (<https://riverdischarge.blogspot.com/>) para procesar las imágenes de video, y el software BaRatinAGE para construir la relación nivel-caudal mediante la inferencia bayesiana. Como sensores de referencia se utiliza un radar de velocidad superficial y un velocímetro de efecto acústico doppler. La metodología se prueba en un canal aforador de garganta cortada. El experimento se realizó en un establecimiento arrocero en el norte de Uruguay. Los resultados sugieren que los canales aforadores se pueden calibrar mediante procesamiento de imágenes de video y que la incertidumbre puede ser cuantificada mediante inferencia bayesiana. Un beneficio del método propuesto es que utiliza software libre que puede ser aplicado de forma sencilla en pequeños establecimientos agrícolas.

Palabras clave: calibración de canales aforadores, RlveR, BaRatinAge

Resumo

O arroz é uma cultura que requer grande quantidade de água ao longo de todo o seu ciclo produtivo para garantir um bom rendimento, o que leva a um gasto de água maior em comparação com outras culturas. O Uruguai é um país que planta cerca de 160.000 ha/ano, o que demanda cerca de 1.760 hm³/ano de água, obtendo valores médios de produtividade muito altos a nível internacional de 9.000kg/ha. A irrigação geralmente é feita por inundação, conduzindo a água através de canais escavados onde são usadas comportas para a regulação da água e, em alguns poucos casos, instalam-se dispositivos para a sua medição. A crescente pressão que existe sobre o recurso água gera a necessidade de ampliar o conhecimento dos consumos de água ao nível das parcelas. Os canais medidores são uma oportunidade nesse sentido, no entanto, requerem calibração e ajuste com medições, o que geralmente é omitido devido ao seu alto custo e complexidade. Este trabalho propõe uma metodologia econômica para a calibração de canais medidores por meio do processamento de imagens de vídeo. A metodologia utiliza o software RlveR (<https://riverdischarge.blogspot.com/>) para processar as imagens de vídeo e o software BaRatinAGE para construir a relação nível vazão por meio da inferência Bayesiana. Como sensores de referência, utiliza-se um Radar de Velocidade Superficial e um Velocímetro de Efeito Acústico Doppler. A metodologia é testada em um canal medidor de garganta cortada. O experimento foi realizado em uma fazenda de arroz no norte do Uruguai. Os resultados sugerem que os canais medidores podem ser calibrados por meio do processamento de imagens de vídeo e que a incerteza pode ser quantificada por meio da inferência Bayesiana. Uma vantagem do método proposto é que ele utiliza software livre que pode ser aplicado de forma simples em pequenas propriedades.

Palavras-chave: calibração de calhas da vazão, RlveR, BaRatinAge

1. Introducción

Uruguay cosecha una gran variedad de granos (e. g. soja, arroz, trigo, maíz, cebada, colza), lo que demanda un volumen importante de agua y sistemas de riego eficientes en donde se conozcan y controlen los caudales⁽¹⁾. El arroz es el cultivo que más agua requiere debido a la técnica de riego, que se aplica por inundación del suelo entre 15 y 25 días luego de la siembra, cuando el cultivo tiene entre 3 y 5 hojas⁽²⁾. Por lo general se destinan entre 8.000 y 15.000 m³/ha de agua para el cultivo de arroz en todo su ciclo, lo que representa el 90 % del agua destinada para riego en todo el país⁽³⁾.

La medición del caudal (aforo) es una operación rutinaria fundamental en los sistemas irrigados. El aforo es un procedimiento complejo que rara vez se obtiene mediante una medición directa del volumen de agua en función del tiempo⁽⁴⁾. Sin em-

bargo, en la mayoría de los casos la única alternativa viable es emplear técnicas indirectas en las que se miden la velocidad y la geometría de la sección transversal (en ocasiones con sensores costosos) y se estima el caudal como el producto de la velocidad por el área⁽⁵⁾. Un enfoque más práctico emplea la relación teórica de nivel-caudal en secciones de geometría conocida, tales como canales aforadores, vertederos, orificios, que son ampliamente utilizados en sistemas de riego⁽⁶⁾.

Los canales aforadores son estructuras hidráulicas desarrolladas para medir el caudal en flujos a superficie libre⁽⁷⁾. Su practicidad hace que sean ampliamente utilizados en sistemas de riego, drenaje municipal y plantas de tratamiento. Existe una amplia variedad de canales aforadores (e. g. Pars-hall, tipo H, Palmer-Bowlus, trapezoidales, de garganta cortada, Montana, RBC), cada uno con beneficios específicos para cada aplicación. El canal



de garganta cortada (Figura 1) fue desarrollado en la década de 1960 con la idea de tener un aforador de fácil construcción, idóneo para sitios con bajo gradiente hidráulico. Un aforador de garganta cortada puede funcionar a flujo libre o a flujo sumergido. El flujo libre ocurre cuando el nivel de agua en la sección divergente no es suficientemente alto para reducir la carga hidráulica en la sección convergente. Los dos tipos de flujo pueden ser identificados por medio de la excedencia del umbral H_b/H_a , que depende del tamaño de cada aforador⁽⁸⁾.

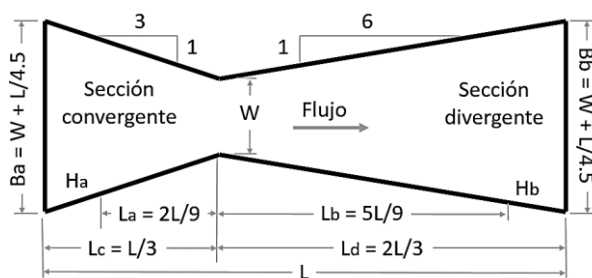


Figura 1. Vista de planta de un aforador de garganta cortada

La relación nivel-caudal o curva de operación de un canal aforador sigue la ecuación 1 para flujo libre y la ecuación 2 para flujo sumergido.

Ecuación 1:

$$Q = a1(H_a - h_0)^{b1}$$

Ecuación 2:

$$Q = \frac{a2((H_a - H_b)^{b1}}{\left(-\log\left(\frac{H_b - h_0}{(H_a - h_0)}\right)\right)^{b2}}$$

Donde Q es el caudal a flujo libre; H_a el nivel de agua en la sección convergente; $a1$ la constante de descarga a flujo libre que depende de la geometría del aforador y de las unidades de Q , y $b1$ el exponente de descarga a flujo libre que depende de la geometría del aforador; H_b es el nivel en la sección divergente; $a2$ la constante de descarga para flujo sumergido; $b2$ el exponente para flujo sumergido, y h_0 el nivel para gasto nulo. Para facilitar su implementación los parámetros $a1$, $b1$, $a2$ y $b2$ han sido generalizados para varios tamaños de aforadores⁽⁹⁻¹⁰⁾. Los parámetros teóricos pueden sufrir desviaciones debido a eventuales diferencias entre las dimensiones del aforador y las dimensiones teóricas (e. g. ancho de garganta incorrecto, ubicación de los puntos de medición,

nivelación de los puntos de medición, pendiente del eje). Para solucionar este inconveniente es recomendable calibrar la curva teórica para cada aforador; sin embargo, por lo general la calibración es omitida por su alto costo y complejidad.

Existe una amplia gama de instrumentos hidrométricos que pueden utilizarse para calibrar un canal aforador. Muchos de ellos son de alto costo, inaccesibles para establecimientos de pequeño y mediano porte⁽¹¹⁾. De forma más simple y económica, el desplazamiento de partículas o trazadores es un método no intrusivo que permite calcular la velocidad mediante la observación directa de la trayectoria de las partículas en el agua⁽¹²⁾. Recientemente, el método se ha mejorado incorporando el procesamiento de imágenes de video⁽¹³⁻¹⁴⁾. Las imágenes de video permiten la detección de cambios de magnitud y dirección en el campo de velocidades, así como la medición más precisa del tiempo de desplazamiento de las partículas⁽¹⁵⁾. Por otro lado, todavía se tiene la limitante en cuanto a que la velocidad media del perfil de agua debe ser estimada a partir de un perfil teórico, lo que introduce incertidumbre en el aforo⁽¹⁶⁾. Algunos software que ayudan a procesar las imágenes de video con fines hidrométricos son: RlveR, Fudaa-LSPIV, Discharge⁽¹⁷⁻²⁰⁾.

La calibración de la curva de operación de un canal aforador está afectada por dos tipos de incertidumbre: la epistémica o paramétrica, que deriva de la representación imperfecta del comportamiento hidráulico a través de la curva de operación; y la aleatoria, que se relaciona con los errores de medición de nivel y caudal. La incertidumbre paramétrica puede reducirse mediante la asimilación de datos utilizando inferencia bayesiana⁽²¹⁻²³⁾. La inferencia bayesiana es un método costoso en tiempo de cómputo que, tras los avances en capacidad de cálculo de los computadores, se ha vuelto más accesible⁽²⁴⁾. Por otro lado, sigue requiriendo el desarrollo de algoritmos complejos y conocimiento previo de la incertidumbre, lo que limita su aplicación para la solución de una gran variedad de problemas prácticos⁽²²⁾. El software BaRatinAGE es una solución operativa, de libre acceso, específicamente desarrollada para realizar la inferencia bayesiana de la relación nivel-caudal en canales naturales⁽¹⁸⁾⁽²⁵⁾. Es utilizado de forma operativa por diversos servicios hidrológicos e instituciones de investigación alrededor del mundo⁽²⁶⁻²⁹⁾.

Este trabajo tiene por objetivo proponer y probar una metodología económica para la calibración de canales aforadores mediante el procesamiento de

imágenes de video e inferencia bayesiana. Se plantean dos hipótesis de trabajo para la inferencia bayesiana: primero, que los sesgos de la curva de operación teórica pueden ser identificados, y segundo, que la incertidumbre paramétrica de la curva de operación teórica puede ser reducida. Ambas hipótesis suponen la asimilación de los datos obtenidos a partir del procesamiento de imágenes de video mediante la inferencia bayesiana. Las pruebas se desarrollan en un aforador de garganta cortada de un establecimiento arroce-ro ubicado en el norte de Uruguay.

2. Materiales y métodos

La metodología propuesta plantea actualizar la curva de operación del canal aforador mediante la asimilación de mediciones de nivel y caudal. Para ello se realizan varias mediciones de nivel y caudal distribuidas en el rango de operación del aforador. El número de mediciones se estableció a manera de optimizar el trabajo en una única jornada de campo, evitando la ocurrencia de flujos transitorios durante las mediciones. La condición de flujos estacionarios se verificó observando que los niveles en el aforador fueran los mismos antes, durante y después de la medición.

Se utiliza el procesamiento de imágenes de video con el software RlveR para calcular el caudal. Adicionalmente, se verifican los resultados de RlveR contra mediciones realizadas con un velocímetro de efecto acústico doppler (ADV) y un radar de velocidad superficial (SVR). Luego, con el software BaRatinAGE se actualiza la curva de

operación del aforador utilizando la inferencia bayesiana de los diferentes tipos de mediciones realizadas.

2.1 Canal aforador

Se utiliza un canal aforador de garganta cortada construido en hormigón. El aforador funciona de forma rutinaria para medir los caudales erogados para riego en la represa Buena Vista (Salto, Uruguay, Figura 2). El aforador fue construido en una base elevada sobre el canal, lo que impide la ocurrencia de flujo sumergido. Por este motivo el ensayo se realiza únicamente para flujo libre. Las dimensiones del canal aforador se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Dimensiones del aforador

Parámetro	Valor real	Valor teórico	Descripción
W	1,00	1,016	Ancho de la garganta (m)
L	2,31	2,286	Longitud del aforador (m)
Ba	1,48	1,524	Ancho de sección convergente (m)
Bb	1,48	1,524	Ancho de la sección divergente (m)
La	0,49	0,508	Distancia piezómetro H_a - garganta (m)
Lb	1,22	1,270	Distancia garganta - piezómetro H_b (m)
Lc	0,74	0,762	Distancia convergencia - garganta (m)
Ld	1,57	1,524	Distancia garganta - divergencia (m)
H	0,76	-	Altura de la pared lateral (m)
S	0,006	0	Pendiente longitudinal (m/m)



Figura 2. Canal aforador de garganta cortada de la represa Buena Vista y medición de la velocidad superficial por medio de radar



2.2 Instrumentos de medición

Se utilizan tres sensores para medir la velocidad del agua. El primer sensor es la cámara de video de un teléfono inteligente. Con ella se graban las imágenes que serán procesadas con el software RlveR para obtener la velocidad superficial del agua. La cámara de video tiene capacidad de hasta 1920×1080 píxeles a 30fps, que es una resolución de video disponible para cualquier teléfono inteligente de baja gama actual. Para poder realizar una medición de la velocidad a través del software RlveR es necesario que la superficie del agua posea "buena textura", es decir, que existan irregularidades en la superficie que puedan ser identificadas mientras se desplazan. Debido a esto, es importante que durante la captura de imágenes no existan condiciones que afecten la superficie libre, como oscilaciones o viento.

El segundo sensor es un velocímetro de efecto acústico doppler (ADV). Es un sensor intrusivo que permite medir la velocidad del agua a una profundidad dada con una resolución de hasta 0,001 m/s para velocidad y 0,01 m para profundidad. El tercer sensor es un radar de velocidad superficial (SVR, Figura 2) que opera mediante el procesamiento por efecto doppler de un pulso electromagnético de 24,150 GHz. El SVR opera en el rango de 0,3-20 m/s con resolución de 0,03 m/s, siendo la superficie de detección una elipse de semeje menor aproximadamente $1/5$ de la distancia del sensor al agua y semeje mayor que depende del ángulo de inclinación del SVR (cono de detección de 12°). El caudal se calcula siguiendo la metodología de la sección media⁽³⁰⁾ para las mediciones con ADV y RlveR. Se utilizaron 15 verticales para el ADV a manera de garantizar que el gasto parcial

no superara el 10 % del gasto total, mientras que en RlveR el software define el número de verticales en función de la resolución del campo vectorial del procesamiento del video. Para el ADV, se utiliza un solo punto por vertical definido al 60 % de la profundidad, mientras que para RlveR se aplica el coeficiente de velocidad superficial para canales de hormigón de 0,9⁽¹⁶⁾, que supone que la velocidad media de la sección es igual a 0,9 de la velocidad superficial. Dado que la superficie de detección de velocidad del SVR abarca casi la totalidad de la zona de convergencia del canal, se calculó el caudal multiplicando el área de la sección transversal por la velocidad medida con el SVR suponiendo el mismo coeficiente de velocidad superficial que RlveR. El SVR y el ADV son utilizados como métodos de referencia para evaluar los resultados de RlveR.

2.3 Grabación y procesamiento de imágenes de video

La cámara de video se coloca sobre la sección de convergencia para reducir la deformación de la imagen proyectada. La corrección de la imagen se realiza posteriormente en oficina con el software RlveR⁽¹⁹⁾. Para ello, previamente se marcan 4 puntos de control en las paredes de la sección de convergencia y se miden las 6 distancias de transformación ortogonal entre los 4 puntos de control (Figura 3). Una vez ubicada la cámara, se vierten trazadores aguas arriba de manera de que el flujo los mueva a través del aforador. En este experimento se utilizan hojas de eucalipto ya que se consiguen con facilidad en las adyacencias del lugar. Seguidamente, se graba el movimiento de los trazadores en la sección durante 1 minuto.

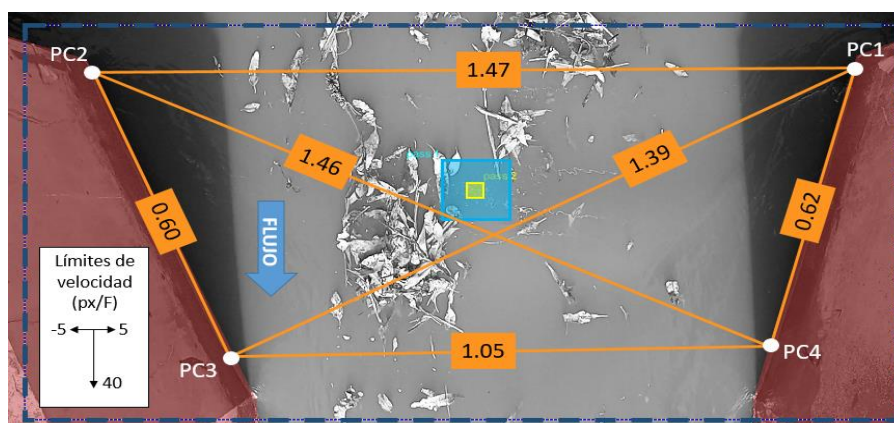


Figura 3. Vista superior de la sección de convergencia del canal aforador de garganta cortada durante la grabación de video, regiones de exclusión para el procesamiento de imágenes de video (polígonos rojos), región de procesamiento (rectángulo azul con línea discontinua), 1.^a ventana de interrogación (cuadrado azul, 128 px), 2.^a ventana de interrogación (rectángulo amarillo, 32 px), puntos de control y distancias de transformación ortogonal (líneas anaranjadas, PC1, PC2, PC3, PC4), y límites de velocidad para el procesamiento de imágenes

El procesamiento de imágenes de video se realiza para obtener el campo de velocidad superficial del agua a partir de una secuencia de imágenes. Utilizando el software RlveR se siguen 9 pasos:

Paso 1: extracción de imágenes de video o fotogramas. El video está formado por una secuencia de imágenes de alta frecuencia, la extracción de los fotogramas permite medir la distancia y el tiempo de desplazamiento de los trazadores en unidades de píxeles/fotograma (px/F). En este paso se selecciona un segmento del video que contenga el movimiento de los trazadores sin interferencias.

Paso 2: selección de la región de interés. Para evitar cambios repentinos en el nivel de agua que limiten la transformación ortogonal de las imágenes, se selecciona la sección de convergencia del aforador excluyendo la garganta del aforador. Esta selección considera que la superficie del agua en esa sección está contenida en un plano. Luego se delimita el área en la que se desea calcular el campo de velocidades y se marcan las regiones a ser excluidas, tales como márgenes y obstáculos.

Paso 3: procesamiento de fotogramas. Se utiliza la transformada rápida de Fourier (FFT) con dos ventanas de interrogación de tamaños 128 y 32px. Esta configuración ofrece un buen compromiso entre resolución y tiempo de cómputo.

Paso 4: selección de límites de velocidad. Se definen los límites de velocidad de -5 a 5 px/F en la dirección ortogonal al flujo, y de 0 a 40 px/F en la dirección del flujo.

Paso 5: interpolación espacial y promedio temporal. Se realiza para extender los vectores de velocidad de las partículas en toda la sección de convergencia, se interpola espacialmente con el promedio de vecinos más cercanos (como parte de la rutina de validación de vectores del software) y luego se calcula la velocidad media en px/F para la duración del video seleccionado.

Paso 6: transformación ortogonal. Supone que la superficie del agua está contenida en un plano, para hacer la transformación se referencian las imágenes utilizando las 6 distancias entre los puntos de control. Esta acción permite transformar de px a metros el campo medio de velocidades obtenido en el paso 5.

Paso 7: definición del tiempo entre fotogramas. El software identifica automáticamente el tiempo entre fotogramas registrado por la cámara para transformar las unidades de tiempo de F a segundos.

Paso 8: identificación de la sección transversal. Se traza una línea recta perpendicular al flujo en la sección en la que se conocen las profundidades y se desea obtener las velocidades superficiales para el cálculo del aforo.

Paso 9: cálculo del aforo. Se ingresan las profundidades de la sección transversal y se calcula el caudal siguiendo el método de la sección media, se utiliza el coeficiente de velocidad superficial sugerido para canales de concreto de 0,9⁽¹⁶⁾.

2.4 Inferencia bayesiana

La asimilación de las mediciones y su incertidumbre se realiza a través de la inferencia bayesiana. El software BaRatinAGE⁽¹⁸⁾ se utiliza como herramienta para este fin. La inferencia bayesiana requiere, por una parte, las mediciones de nivel y caudal y los modelos de error de las mediciones; y, por otra parte, las distribuciones de probabilidad de los parámetros de la curva de operación teórica.

Se consideran los modelos de errores de las ecuaciones 3 y 4 para las mediciones de nivel y caudal.

Ecuación 3:

$$\underline{H}_a = H_a + \epsilon_h$$

Ecuación 4:

$$\underline{Q} = Q + \epsilon_q$$

Donde \underline{H}_a y \underline{Q} son los niveles y los caudales con su incertidumbre (incertidumbre aleatoria); ϵ_h son los errores de medición de nivel, que se asumen gaussianos con media cero y desviación estándar de 0,01 m, y ϵ_q los errores de medición de caudal, considerados gaussianos, con media cero y desviación estándar que depende del tipo de aforo realizado y de la magnitud del caudal. Las mediciones con ADV típicamente tienen valores de incertidumbre en el rango de 5 a 7 %, mientras que los aforos con mediciones de velocidad superficial están en el rango de 10 a 20 %⁽³¹⁾. En este trabajo se utiliza 5 % de incertidumbre para el ADV. RlveR selecciona la incertidumbre de 15 % para mantenerla en el medio del rango sugerido para mediciones de velocidad superficial. Luego, para considerar que el SVR mide velocidades homogéneas en la superficie de detección (condición que no se cumple en este experimento), se selecciona 20 % de incertidumbre.

La curva de operación del canal aforador se formaliza suponiendo distribuciones de probabilidad gaussiana con promedio igual a los valores teóri-



cos de los parámetros y las desviaciones estándar presentadas en la Tabla 3. Esta condición define la incertidumbre epistémica de la curva de operación. Los valores han sido obtenidos a partir de las relaciones genéricas disponibles en la literatura⁽⁸⁾.

3. Resultados

Se calcularon los caudales para los niveles de 7, 11, 17,5, 22, 26, 28, 30 y 31 cm mediante la ecuación teórica y las mediciones con ADV, SVR y RiveR (Tabla 2). Los caudales se midieron hasta 31 cm para evitar desborde aguas arriba del aforador. La medición con SVR se vio afectada por la velocidad del flujo a bajo caudal, por esta razón los niveles inferiores a 20 cm tienen datos faltantes. Se observó que los valores de caudal medidos con todos los sensores fueron más pequeños que los valores teóricos. Particularmente, la diferencia porcentual entre los valores de caudal teóricos y los valores medidos se incrementa al disminuir el nivel.

La Figura 4B muestra el campo de velocidad en la sección de convergencia del aforador para el nivel de 28 cm, obtenido mediante el procesamiento de imágenes de video. La imagen se presenta luego de realizar la transformación px a metros y F a

segundos (pasos 6 y 7). Se observa que la magnitud de la velocidad del agua es mayor en la garganta del aforador e inferior en las paredes y la boca. Un patrón similar se observó en los otros niveles aforados. Adicionalmente, la Figura 4A presenta las velocidades parciales en la sección transversal seleccionada para el cálculo del caudal mediante el procesamiento de imágenes aplicando el método de sección media.

Tabla 2. Niveles, caudales teóricos, caudales medidos y diferencia porcentual de caudales, entre paréntesis

Nivel (cm)	Caudal teórico (lps)	Caudal ADV (lps)	Caudal SVR (lps)	Caudal RiveR (lps)
7,0	35	18 (-49%)	-	14 (-60%)
11,0	70	43 (-39%)	-	45 (-36%)
17,5	144	129 (-10%)	-	98 (-32%)
22,0	205	149 (-27%)	152 (-26%)	117 (-43%)
26,0	266	227 (-15%)	209 (-21%)	159 (-40%)
28,0	298	280 (-6%)	239 (-20%)	209 (-30%)
30,0	332	304 (-8%)	284 (-14%)	205 (-38%)
31,0	349	321 (-8%)	303 (-13%)	265 (-24%)

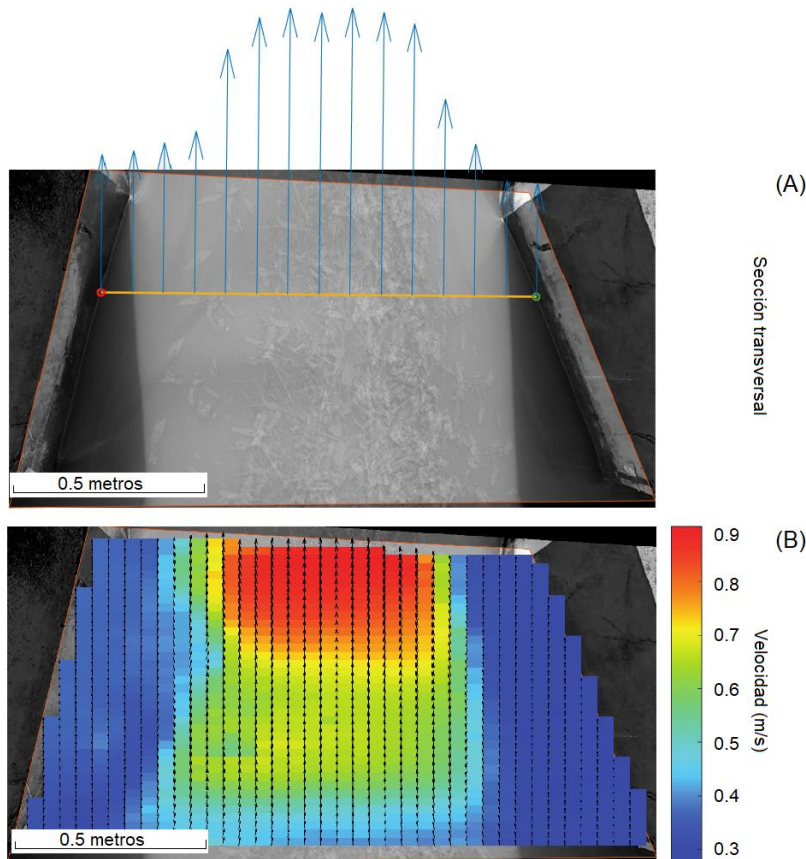


Figura 4. (A) Velocidades parciales en la sección transversal y (B) Campo de velocidad superficial y ubicación de la sección transversal obtenidas mediante el procesamiento de imágenes de video en la sección de convergencia del aforador para el nivel de 28 cm (flujo de abajo hacia arriba)

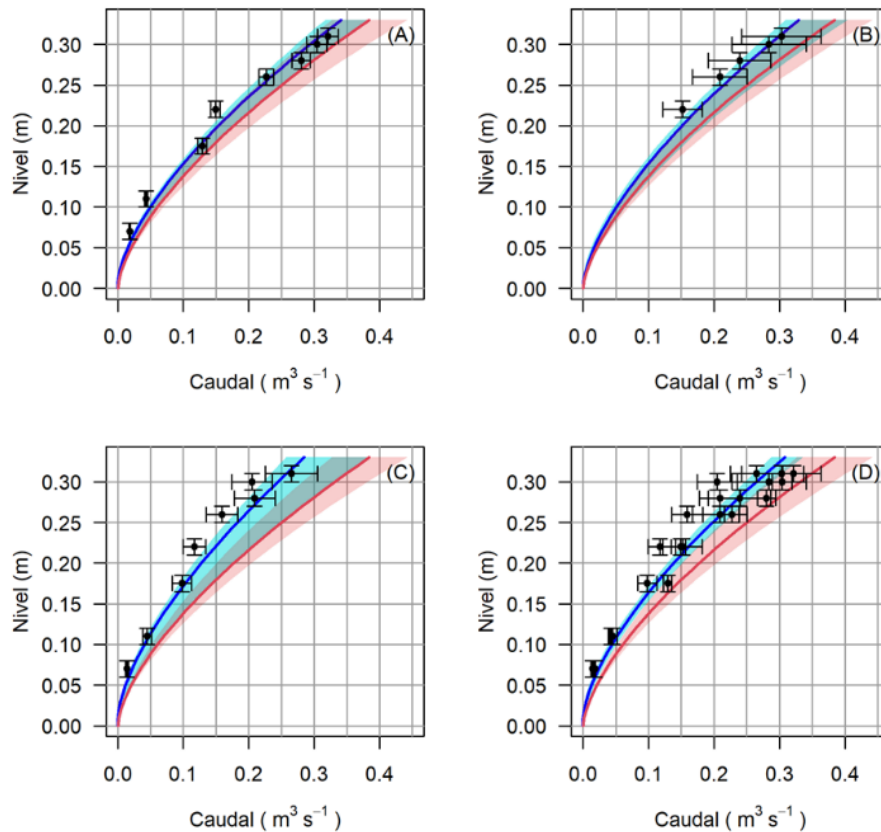


Figura 5. Inferencia bayesiana de la curva de operación del aforador utilizando: (A) Velocímetro de efecto acústico doppler (ADV), (B) Radar de velocidad superficial (SVR), (C) Procesamiento de imágenes de video (RlveR), y (D) todas las mediciones realizadas. Las áreas sombreadas indican la incertidumbre en el intervalo creíble de 95 %, y las cruces, la incertidumbre aleatoria de las mediciones

Se actualizó la curva de operación del aforador mediante inferencia bayesiana considerando 4 conjuntos de mediciones: ADV, SVR, RlveR y el conjunto de todas las mediciones (Figura 5). La curva obtenida a partir de todas las mediciones juntas (Figura 5D) presenta la menor incertidumbre, seguida de la curva realizada con los datos del ADV (Figura 5A), el SVR (Figura 5B) y por último, con la mayor incertidumbre, la inferencia realizada con RlveR. Adicionalmente, la inferencia bayesiana sugiere en todos los casos una sobreestimación de los caudales en la curva teórica y una reducción de la incertidumbre epistémica con excepción de inferencia realizada con las mediciones RlveR. La Tabla 3 presenta los valores promedio y desviación estándar de los parámetros *a priori* y *a posteriori* de la curva de operación. Cuando la desviación estándar de los parámetros *a posteriori* es menor que la desviación estándar de los parámetros *a priori* significa que se reduce la incertidumbre epistémica. Los valores de la Tabla 3 confirman lo interpretado gráficamente en la Figura 5.

Tabla 3. Valores promedio y desviación estándar (valores entre paréntesis) de los parámetros *a priori* y *a posteriori* de la curva de operación

	h0	a1	b1
Teórico (<i>a priori</i>)	0,000 (0,005)	2,131 (0,160)	1,545 (0,010)
ADV (<i>a posteriori</i>)	0,007 (0,005)	1,959 (0,097)	1,544 (0,010)
SVR (<i>a posteriori</i>)	0,003 (0,005)	1,839 (0,135)	1,538 (0,010)
RlveR (<i>a posteriori</i>)	0,009 (0,005)	1,652 (0,182)	1,548 (0,010)
Todas (<i>a posteriori</i>)	0,008 (0,005)	1,782 (0,084)	1,548 (0,010)

4. Discusión

La inferencia bayesiana de la curva de operación del canal aforador se basó en el conocimiento teórico⁽⁸⁾ y asimiló las mediciones de nivel y caudal realizadas durante el experimento. Las curvas de operación inferidas confirman que es posible identificar posibles sesgos con la metodología propuesta (primera hipótesis). Particularmente, se identificó la sobreestimación del caudal teórico, que es mayor para caudales bajos. La sobreestimación podría deberse a un desplazamiento de la escala de nivel del aforador, lo que produce un



error sistemático no despreciable en la medición de caudal⁽²⁵⁾. A partir de la inferencia bayesiana se obtiene un valor positivo de casi 1 cm para el parámetro h_0 con desviación estándar de 0,5 cm, lo que sugiere que la escala del nivel podría estar desplazada. Dado que la curva de operación sigue una ecuación de potencia, el efecto del desplazamiento de la escala de nivel no es lineal y es mucho más significativo en niveles bajos. Por otro lado, estudios anteriores señalan que la precisión de los canales aforadores se degrada especialmente a niveles bajos, pudiendo llegar a alcanzar desviaciones importantes, lo que resalta la importancia de la calibración del canal aforador en el rango en el que se desea utilizar luego de su instalación⁽³²⁻³³⁾.

La hipótesis de que la incertidumbre paramétrica puede ser reducida mediante procesamiento de imágenes de video e inferencia bayesiana se rechaza. El número de mediciones y la incertidumbre aleatoria de las mediciones son factores clave en la inferencia bayesiana⁽³⁴⁻³⁵⁾. Se trabajó con el supuesto de que la incertidumbre aleatoria está relacionada con los errores de medición, que se consideran normales de media cero y desviación estándar conocida. En esta aproximación, el caudal se obtiene como el producto de la velocidad media en la sección transversal por el área⁽³⁰⁾, en la que la velocidad media de la sección podría estar afectada por errores sistemáticos como el uso de coeficientes de velocidad inadecuados, que producirían errores de medición con media diferente de cero. Una posible extensión de este trabajo podría ser la inferencia bayesiana utilizando modelos de errores con media distinta de cero. Para ello, será necesaria la utilización de lenguaje de programación ya que el software BaRatinAGE no dispone de esa capacidad.

Se observó que el intervalo creíble de la curva inferida mediante procesamiento de imágenes de video es mayor que la curva teórica, no así para las otras mediciones. El resultado expone la sensibilidad de las mediciones en la inferencia bayesiana, que estuvieron limitadas por su cantidad y posición⁽³⁶⁾. Para solucionar este tipo de inconvenientes se podría realizar una prueba de sensibilidad, que identificaría las mediciones relevantes⁽³⁷⁾. Otra alternativa recomendable especialmente en conjuntos de datos pequeños es la actualización bayesiana, que busca suavizar los efectos de eventuales datos dudosos a través de un proceso iterativo donde se actualice la distribución *a priori* de los parámetros con la distribución *a posteriori*⁽³⁸⁾.

El procesamiento de imágenes de video permite observar el patrón de velocidades en la superficie del agua en la garganta del aforador a partir de una medición rápida y sencilla, lo que es una característica única de ese tipo de mediciones. Este tipo de representaciones también se pueden obtener con sensores clásicos que miden la velocidad puntual. De hecho, las mediciones con ADV también mostraron reducciones importantes de la velocidad a medida que se acercaba el punto de medición a la pared del aforador. Sin embargo, para obtener el patrón de velocidad con otro tipo de sensores sería necesario realizar múltiples mediciones e implementar un proceso de interpolación previo a la visualización de los resultados⁽³⁹⁾, lo que incrementaría considerablemente el tiempo de trabajo tanto en campo como en oficina. Los métodos computacionales de dinámica de fluidos son otra alternativa para visualizar el patrón de velocidad en el plano horizontal. Modelos como el FLOW-3D, el AnsysFluent o el OpenFOAM han mostrado patrones similares al obtenido mediante procesamiento de imágenes de video⁽³⁶⁾⁽⁴⁰⁾.

Estudios anteriores han utilizado el procesamiento de imágenes de video en cauces naturales, principalmente para aforos en eventos de crecientes o en flujos torrenciales, que son situaciones en las que los métodos tradicionales de contacto no pueden ser utilizados⁽⁴¹⁻⁴³⁾. No se ha encontrado bibliografía en la que el procesamiento de imágenes haya sido utilizado para la calibración de un canal aforador, por lo que la propuesta presentada en este trabajo sería la primera aplicación del procesamiento de imágenes de video para ese fin. Es conveniente mencionar que, en este tipo de aplicaciones, el flujo es gradualmente variado, el cual incrementa su velocidad y varía el tirante de agua al acercarse a la garganta del aforador; por tal motivo la ubicación de la sección transversal en la que el software RiveR realiza el cálculo de caudal podría ser un factor sensible, pudiendo estar influenciado tanto por las magnitudes de las velocidades del flujo como por la transformación ortogonal de la imagen.

El flujo transitorio fue una preocupación mayor, lo que extendió el tiempo del experimento, ya que fue necesario esperar alrededor de 40-50 minutos entre mediciones para alcanzar las condiciones de estacionalidad. Por otra parte, la medición con ADV es lenta (30-40 minutos cada aforo), ya que demanda la medición de la velocidad por 40 segundos en al menos 15 puntos de la sección transversal (método de sección media), lo que incrementa la posibilidad de que el caudal al inicio

y al final de cada aforo sea diferente. En los aforos con RlveR y SVR el inconveniente de flujo estacionario es menor. Los aforos se completan en menos de 1 minuto, donde las diferencias de caudal al inicio y al final podrían considerarse despreciables. Esta característica plantea la interrogante de si RlveR podría ser utilizado para realizar la calibración del canal aforador en condiciones no estacionarias. La hipótesis de trabajo para esta posible extensión plantearía que en intervalos de tiempo cortos el flujo podría ser considerado estacionario, lo que optimizaría el trabajo en campo al requerir menos tiempo para completar el ensayo y aumentar el número de mediciones.

5. Conclusiones

El uso de la técnica de calibración mediante procesamiento de imágenes de video e inferencia bayesiana es una opción económicamente viable para aquellos que buscan una alternativa de menor costo. A su vez, es útil para el monitoreo y la operación de los canales de riego en situaciones donde no se dispone de las herramientas necesarias para implementar técnicas más precisas. Por tal motivo, es importante tener en cuenta sus limitaciones y considerar cuidadosamente la interpretación de sus resultados.

La calibración de canales aforadores mediante el uso de teléfonos inteligentes, el procesamiento de imágenes de video y la inferencia bayesiana es una alternativa accesible y sencilla para estimar el caudal en canales de riego. Esta técnica ofrece ventajas como la accesibilidad y la simplicidad, lo que permite que pueda ser utilizada por el personal técnico de la gran mayoría de los establecimientos agrícolas. En definitiva, representa una alternativa práctica para la medición del caudal en canales de riego y una herramienta útil para la optimización del uso del agua en la agricultura. Este proceso habilitaría una estimación relativamente sencilla del caudal en canales de riego de chacras de arroz donde no existan estructuras aforadoras. Entre las principales bondades están el bajo costo, y la rápida y sencilla implementación en campo; en contraparte, esta técnica tiene una mayor incertidumbre en las mediciones y un mayor tiempo de análisis en oficina en comparación con los métodos tradicionales ADV o molinete.

La inferencia bayesiana es sensible a la incertidumbre de los datos asimilados, lo que afecta el resultado de la calibración. Para reducir la incertidumbre epistémica se requiere de la utilización de instrumentos precisos como el velocímetro de

efecto acústico doppler (ADV) o molinete, debido a que la cantidad, la distribución y la incertidumbre de las mediciones son muy sensibles en el resultado de la inferencia bayesiana. Por otro lado, el procesamiento de imágenes de video y la inferencia bayesiana también permiten identificar sesgos en la curva teórica de los canales aforadores, lo que puede aportar un conocimiento valioso sobre la operación real de los canales.

Agradecimientos

El trabajo de investigación fue realizado con el apoyo de El Junco – Donistar (<http://www.eljunco.com.uy/>) y de los ingenieros agrónomos Bernardo Bocking, Santiago Bandeira y Marcos Rodríguez. El financiamiento fue otorgado por la Comisión Sectorial de Investigación Científica de la Universidad de la República, Programa I + D 2018, ID; 105 Nombre del grupo: Recursos Hídricos y Riego, Proyecto: Hacia un manejo eficiente del agua en la actividad agropecuaria.

Transparencia de datos

Datos disponibles: todo el conjunto de datos que respalda los resultados de este estudio se publicó en el presente artículo.

Contribución de autor

RN: conceptualización, metodología, investigación, escritura del borrador original, supervisión, administración del proyecto; MD: implementación del experimento, tratamiento de datos, visualización; RA: escritura, revisión y edición; BN: escritura, revisión y edición; GA: escritura, revisión y edición; GP: escritura, revisión y edición.

Referencias

1. Betancur L, Ruiz A, Castaño V, Duran P. Medición de agua y transmisión de datos en sistemas de riego por gravedad. En: Arroz: resultados experimentales 2015-2016. Montevideo: INIA; 2016. p. 23-5.
2. Carracelas G, Hornbuckle J, Rosas J, Roel A. Irrigation management strategies to increase water productivity in *Oryza sativa* (rice) in Uruguay. *Agric Water Manag.* 2019;222:161-72.



3. Guía de buenas prácticas en el cultivo de arroz en Uruguay [Internet]. Montevideo: ACA; 2009 [citado 2023 Aug 21]. 32p. Disponible en: <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/4927/1/Guia-de-Buenas-Practicas-Arroz-Uruguay-ACA.pdf>
4. Navas R, Vervoort W, Gamazo P. Bayesian inference of synthetic daily rating curves by coupling Chebyshev polynomials and the GR4J model. En: IAHS Scientific Assembly 2022. [lugar desconocido]: IAHS; 2022. Doi: 10.5194/iahs2022-2.
5. Dobriyal P, Badola R, Tuboi C, Hussain SA. A review of methods for monitoring streamflow for sustainable water resource management. *Appl Water Sci.* 2017;7(6):2617-28.
6. Adeogun A, Mohammed A. Review of methods of measuring streamflow using hydraulic structures. En: Ahsan A, editor. *Hydraulic structures: theory and applications* [Internet]. London: IntechOpen; 2019 [citado 2023 Aug 21]. 12p. Disponible en: <https://cdn.intechopen.com/pdfs/64627.pdf>
7. Kraatz DB, Mahajan IK, editores. *Small hydraulic structures* [Internet]. Vol. 2. Rome: FAO; 1975 [citado 2023 Aug 21]. 292p. Disponible en: <https://www.fao.org/3/bl046e/bl046e.pdf>
8. Temeepattanapongsa S, Merkley GP, Barfuss SL, Smith BL. Generic free-flow rating for cutthroat flumes. *J Hydraul Eng.* 2013;139(7):727-35.
9. Skogerboe GV, Bennett RS, Walker WR. Generalized discharge relations for cutthroat flumes. *J Irrig Drain Div.* 1972;98(4):569-83.
10. Mansanarez V, Le Coz J, Renard B, Lang M, Pierrefeu G, Vauchel P. Bayesian analysis of stage-fall-discharge rating curves and their uncertainties. *Water Resour Res.* 2016;52(9):7424-43.
11. Catsamas S, Shi B, Deletic B, Wang M, McCarthy DT. A low-cost, low-power water velocity sensor utilizing acoustic doppler measurement. *Sensors (Basel).* 2022;22(19):7451. Doi: 10.3390/s22197451.
12. Sanjou M, Kato K, Aizawa W, Okamoto T. Development of drone-type float for surface-velocity measurement in rivers. *Environ Fluid Mech.* 2022;22(4):955-69.
13. Fujita I, Muste M, Kruger A. Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications. *J Hydraul Res.* 1998;36(3):397-414.
14. Muste M, Xiong Z, Schöne J, Li Z. Validation and extension of image velocimetry capabilities for flow diagnostics in hydraulic modeling. *J Hydraul Eng.* 2004;130(3):175-85.
15. Atkins MD. Velocity field measurement using Particle Image Velocimetry (PIV). En: Kim T, Lu TJ, Song SJ, editores. *Application of thermo-fluidic measurement techniques: an introduction.* Amsterdam: Elsevier; 2016. pp. 12566. Doi: 10.1016/B978-0-12-809731-1.00005-8.
16. Hauet A, Morlot T, Daubagnan L. Velocity profile and depth-averaged to surface velocity in natural streams: a review over a large sample of rivers. *E3S Web Conf.* 2018;40:06015. Doi: 10.1051/e3sconf/20184006015.
17. Hauet A. Estimation de débit et mesure de vitesse en rivière par Large-scale particle image velocimetry. *Houille Blanche.* 2009;(1):80-5. Doi: 10.1051/lhb:2009009.
18. Le Coz J, Jodeau M, Hauet A, Marchand B, Le Boursicaud R. Image-based velocity and discharge measurements in field and laboratory river engineering studies using the free FUDAA-LSPIV software. En: *River Flow 2014* [Internet]. Lausanne: [editor desconocido]; 2014 [citado 2023 Aug 21]. pp. 7. Disponible en: <https://hal.inrae.fr/hal-02600735>
19. Patalano A, García CM, Rodríguez A. Rectification of Image Velocity Results (RIVeR): a simple and user-friendly toolbox for large scale water surface Particle Image Velocimetry (PIV) and Particle Tracking Velocimetry (PTV). *Comput Geosci.* 2017;109:323-30.
20. Lüthi B, Philippe T, Peña-Haro S. Mobile device app for small open-channel flow measurement. En: Ames DP, Quinn NWT, Rizzoli AE, editores. *Proceedings of the 7th International Congress on Environmental Modelling and Software*, June 15-19, San Diego, California, USA [Internet]. [lugar desconocido]: IEMSS; 2014 [citado 2023 Aug 21]. pp. 283-7. Available from: <https://scholarsarchive.byu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1035&context=iemssconference>
21. Porter NW, Mousseau VA. Understanding aleatory and epistemic parameter uncertainty in statistical models. En: *Best Estimate Plus Uncertainty International Conference* [Internet]. 2020 [citado 2023 Aug 21]. 10p. Disponible en: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1811616>
22. Wasserman L. *All of statistics: a concise course in statistical inference.* Pittsburgh: Springer; 2004. 442p.

23. Bi S, Bai Y, Zhou X. Bayesian updating: reducing epistemic uncertainty in hysteretic degradation behavior of steel tubular structures. *ASCE ASME J Risk Uncertain Eng.* 2022;8(3):04022039. Doi: 10.1061/AJRUA6.000125.
24. Green PJ, Łatuszyński K, Pereyra M, Robert CP. Bayesian computation: a summary of the current state, and samples backwards and forwards. *Stat Comput.* 2015;25(4):835-62.
25. Horner I, Renard B, Le Coz J, Branger F, McMillan HK, Pierrefeu G. Impact of stage measurement errors on streamflow uncertainty. *Water Resour Res.* 2018;54(3):1952-76.
26. Cawley KM, Harrison N, Nickerson ZL. NEON user guide to stage-discharge rating curves (NEON.DP4.00133) [Internet]. [lugar desconocido]: NEON; 2022 [citado 2023 Aug 21]. 14p. Disponible en: https://data.neonscience.org/api/v0/documents/NEON_ratingCurve_userGuide_vC?inline=true
27. Garcia R, Costa V, Silva F. Bayesian rating curve modeling: alternative error model to improve low-flow uncertainty estimation. *J Hydrol Eng.* 2020;25(5):04020012. Doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001903.
28. Kastali A, Zeroual A, Remaoun M, Serrano-Notivoli R, Moramarco T. Design flood and flood-prone areas under rating curve uncertainty: area of Vieux-Ténès, Algeria. *J Hydrol Eng.* 2021;26(3):05020054. Doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002049.
29. Kazimierski LD, García PE, Ortiz N, Morales M. Aforos de ríos y arroyos en la Cuenca Matanza-Riachuelo: Informe 05. Elaboración de relaciones altura – caudal (curvas HQ) [Internet]. Ezeiza: Acumar; 2021 [citado 2023 Aug 21]. 163p. Disponible en: <https://repositorio.ina.gob.ar/items/c1504ca-a46c-4c6a-99cd-68184626bcd4>
30. World Meteorological Organization. Manual on stream gauging. Geneva: WMO; 2010. 2p.
31. Le Coz J. A literature review of methods for estimating the uncertainty associated with stage-discharge relations [Internet]. Geneva: WMO; 2012 [citado 2023 Aug 21]. 21p. Report No.: PO6a:21. Disponible en: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=b685243d91acd17a64c3e31ecff08ea39d5b279d>
32. Khosronejad A, Herb W, Sotiropoulos F, Kang S, Yang X. Assessment of Parshall flumes for discharge measurement of open-channel flows: a comparative numerical and field case study. *Measurement.* 2021;167:108292. Doi: 10.1016/j.measurement.2020.108292.
33. Heiner B. Parshall flume staff gauge location and entrance wingwall discharge calibration corrections [tesis de maestría]. Logan (US): Utah State University, Civil and Environmental Engineering; 2009. 46p. Doi: 10.26076/ea6-ebf8.
34. Berger JO, Pericchi LR. Training samples in objective Bayesian model selection. *Ann Stat.* 2004;32(3):841-69.
35. Martin J, Elster C. Aleatoric uncertainty for errors-in-variables models in deep regression. *Neural Process Lett.* 2022;55:4799-818. Doi: 10.1007/s11063-022-11066-3.
36. Heyrani M, Mohammadian A, Nistor I, Dursun OF. Application of numerical and experimental modeling to improve the efficiency of parshall flumes: a review of the state-of-the-art. *Hydrology.* 2022;9(2):26. Doi: 10.3390/hydrology9020026.
37. Rubio PB, Chamoin L, Louf F. Real-time Bayesian data assimilation with data selection, correction of model bias, and on-the-fly uncertainty propagation. *Comptes Rendus Mécanique.* 2019;347(11):762-79.
38. Ferdous R, Khan F, Sadiq R, Amyotte P, Veitch B. Handling and updating uncertain information in bow-tie analysis. *J Loss Prev Process Ind.* 2012;25(1):8-19.
39. Tomas G, Bleninger T, Rennie C, Guarneri H. Advanced 3D mapping of hydrodynamic parameters for the analysis of complex flow motions in a submerged bedrock canyon of the Tocantins River, Brazil. *Water.* 2018;10(4):367. Doi: 10.3390/w10040367.
40. Ran D, Wang W, Hu X. Three-dimensional numerical simulation of flow in trapezoidal cutthroat flumes based on FLOW-3D. *Front Agr Sci Eng.* 2018;5(2):168-76. Doi: 10.15302/J-FASE-2018217.
41. Benacchio V, Piégay H, Buffin-Bélanger T, Vaudor L. A new methodology for monitoring wood fluxes in rivers using a ground camera: potential and limits. *Geomorphology.* 2017;279:44-58.
42. Rozos E, Mazi K, Lykoudis S. On the accuracy of particle image velocimetry with citizen videos: five typical case studies. *Hydrology.* 2022;9(5):72. Doi: 10.3390/hydrology9050072.
43. Jolley MJ, Russell AJ, Quinn PF, Perks MT. Considerations when applying large-scale piv and ptv for determining river flow velocity. *Front Water.* 2021;3:709269. Doi: 10.3389/frwa.2021.709269.