

# Calibración y simulación de un sistema regulado de suministro de agua a través de técnicas de Monte Carlo

## *Validation and simulation of a regulated survey system through Monte Carlo techniques*

Lacasta, A.<sup>a1</sup>, Morales-Hernández, M.<sup>a</sup>, Tejero-Juste, M.<sup>b</sup>, Burguete, J.<sup>c</sup>, Brufau, P.<sup>a</sup> y García-Navarro, P.<sup>a</sup>

<sup>a1</sup>LIFTEC, CSIC-Universidad de Zaragoza. C/ María de Luna, 3. 50002 Zaragoza (España). E-mail: <sup>a1</sup>alacasta@unizar.es

<sup>b</sup>Riegosalz. Ontinar de Salz, Zaragoza (España).

<sup>c</sup>Suelo y Agua. EEAD-CSIC. Zaragoza (España).

Recibido: 30/10/2014

Aceptado: 28/04/2015

Publicado: 20/07/2015

---

## RESUMEN

El flujo en canales se caracteriza por cubrir largas distancias y obedecer a patrones temporales variables. Suele estar regulado por elementos hidráulicos, como compuertas laterales, para asegurar un correcto abastecimiento de agua. La dinámica de este flujo viene gobernada por un sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales llamado de aguas poco profundas. Junto a ellas es necesario establecer una formulación simplificada del funcionamiento de las compuertas. El conjunto forma un sistema no lineal que sólo se puede resolver numéricamente. Aquí se aplica un esquema descentrado explícito de volúmenes finitos con el fin de resolver todo tipo de regímenes. La modelización de las estructuras hidráulicas (compuertas laterales) introduce parámetros con incertidumbre. Por ello, serán calibradas mediante el algoritmo de Monte Carlo, obteniendo como resultado unos coeficientes asociados a cada una de ellas. Posteriormente serán verificadas utilizando casos reales proporcionados por el equipo de monitorización del canal de Pina de Ebro (Zaragoza).

**Palabras clave** | Simulación Hidráulica; Flujo en Superficie Libre; Monte Carlo; Calibración; Ecuaciones de Aguas Poco Profundas.

---

## ABSTRACT

*Channel flow covers long distances and obeys to variable temporal behaviour. It is usually regulated by hydraulic elements as lateral gates to provide a correct of water supply. The dynamics of this kind of flow is governed by a partial differential equations system named shallow water model. They have to be complemented with a simplified formulation for the gates. All the set of equations form a non-linear system that can only be solved numerically. Here, an explicit upwind numerical scheme in finite volumes able to solve all type of flow regimes is used. Hydraulic structures (lateral gates) formulation introduces parameters with some uncertainty. Hence, these parameters will be calibrated with a Monte Carlo algorithm obtaining associated coefficients to each gate. Then, they will be checked, using real cases provided by the monitorizing equipment of the Pina de Ebro channel located in Zaragoza.*

**Key words** | Hydraulic Simulation; Free Surface Flow; Monte Carlo; Calibration; Shallow water model.

## INTRODUCCIÓN

A escala mundial, el 70% de toda el agua dulce va destinada al riego con una creciente demanda de los recursos hídricos para estos fines. En España, cerca del 15% de las superficies agrícolas son de regadío, obteniendo un 55% más de producción. El transporte de este volumen de agua en canales lleva asociada una baja eficiencia. En los últimos años varias planificaciones de modernización de regadíos han proporcionado mejoras en estos puntos, trayendo a las comunidades de regantes nuevas infraestructuras que en la mayoría de los casos son de gran tamaño. Sin embargo, este factor complica el control de las redes de riego. Durante muchos años el control de los sistemas de riego ha sido llevado a cabo de forma manual. El principal inconveniente, además de la dificultad, es la imposibilidad de obtener el conjunto de parámetros eficientes que permiten una gestión productiva del agua. Se justifica una inversión en desarrollo de tecnología que permita mejorar la eficiencia en el transporte de agua de riego.

Las compuertas son obras hidráulicas usadas para controlar el caudal y la altura de agua en redes de canales (Henderson, 1996) para sistemas de riego. El flujo que circula a través de ellas puede ser libre o ahogado, dependiendo de la altura de agua, y cada régimen viene caracterizado por un coeficiente de descarga distinto (Swamee, 1992; Ferro, 2000). Estos coeficientes de descarga han sido analizados en la literatura a través de numerosos estudios teóricos y experimentales (Henderson, 1996; Rajaratnam y Subramanya, 1967; Lin, Yen y Tsai, 2002). El coeficiente de desagüe depende de la apertura de la compuerta, de la energía específica aguas arriba y del tipo de compuerta. Una vez conocida la geometría de la compuerta el problema se reduce a calibrar la pérdida de energía del flujo al atravesar la misma.

El objetivo de este trabajo se centra en el uso de técnicas de simulación para la calibración de Monte Carlo aplicadas a la pérdida de energía que se produce en el flujo a través de las tomas laterales en un canal de riego situado en Pina de Ebro (Zaragoza) que ha sido modernizado en los últimos años, basándonos en medidas de campo.

En primer lugar se presenta el modelo matemático del flujo y las compuertas. Para el flujo se ha usado el modelo de aguas poco profundas, bien conocido. Para las compuertas, la formulación simplificada de la ecuación de descarga suele estar basada en la ecuación de momento o en la ecuación de la energía (Henderson, 1996), siendo esta última la más común. Numerosos autores tales como (Albertson *et al.*, 1950; Rajaratnam, 1967; Suamee, 1992; Habibzadeh *et al.*, 2011) han estudiado las distintas posibilidades que pueden aparecer en el funcionamiento corriente de las compuertas y han propuesto distintas alternativas a los coeficientes que se suelen utilizar en este tipo de formulaciones. A pesar de ello, hay factores externos que pueden hacer variar los coeficientes estándar (Skogerboe y Merkley, 1996) en compuertas reales para ajustar el modelo de manera adecuada a la realidad. En segundo lugar se presenta el método numérico (Burguete y García-Navarro, 2004) utilizado para resolver las ecuaciones.

A continuación se presenta el método de calibración y cómo se ha implementado. El término de calibración aplicado a modelos hidráulicos deberá entenderse como la tarea o proceso en el que se determinan parámetros que, al alimentar al modelo de simulación, permitirán aproximar los valores estimados con el modelo a los valores medidos para el mismo fenómeno (Shamir y Howard, 1968; Pongput y Merkley, 1997). La calibración es un proceso complejo ya que es necesario manejar muchas variables, tanto hidráulicas, como topológicas. Con este fin, se ha diseñado una herramienta para este tipo de estudios y datos obtenidos de los sistemas de telecontrol de la instalación.

En la siguiente sección se presenta el caso que se ha estudiado. Los datos que son recogidos por los sensores de profundidad y los registradores de apertura de compuertas existentes en el canal nos dan información del nivel del agua tanto a la entrada como a la salida del canal así como del movimiento de las compuertas laterales. En una segunda fase se calibran todas y cada una de las compuertas laterales del canal sometido a estudio mediante el procedimiento de Monte Carlo. Para ello, en primer lugar se realiza un procedimiento de búsqueda de casos aislados para cada una de las compuertas laterales que conforman el canal, utilizando los datos proporcionados por los registradores de aperturas de compuertas y por los sensores de profundidad existentes en el canal. Dichos datos han sido previamente tratados. Una vez que tenemos el caso, se simula y calibra simultáneamente obteniendo un coeficiente de calibración, proceso que se repite para todas las compuertas laterales del canal.

En el apartado de validación y verificación del modelo se comparan los datos reales obtenidos del canal de Pina de Ebro, con los datos simulados obtenidos una vez calibradas las compuertas. Para ello se simulan varios casos en los que existen movimientos de varias compuertas a la vez, comparando los resultados no sólo con los datos experimentales medidos por los sensores sino también con los datos proporcionados por el simulador sin llevar a cabo ningún proceso de calibración previa. Por

último, se detallan las conclusiones principales del trabajo, haciendo énfasis en la mejora que ha supuesto la calibración de las compuertas laterales para dotar al programa de simulación de un componente predictivo del que carecía.

## MODELO MATEMÁTICO Y RESOLUCIÓN NUMÉRICA

Las ecuaciones de aguas poco profundas unidimensionales son las que gobiernan el flujo de agua en canales abiertos. Representan conservación de masa y cantidad de movimiento en la dirección longitudinal del canal. Pueden expresarse (García-Navarro *et al.*, 2003) como un sistema de ecuaciones en derivadas parciales de la forma

$$\frac{\partial \mathbf{U}(x,t)}{\partial t} + \frac{d\mathbf{F}(x,\mathbf{U})}{dx} = \mathbf{H}(x,\mathbf{U}) \quad (1)$$

siendo

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} A \\ Q \end{pmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{A} + gI_1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{pmatrix} 0 \\ g[I_2 + A(S_0 - S_f)] \end{pmatrix} \quad (2)$$

donde  $A$  es el área transversal mojada,  $Q$  es el caudal (variables conservadas),  $g=9.8 \text{ m/s}^2$  es la aceleración de la gravedad,  $I_1$  es una integral que representa el término de presión hidrostática,  $I_2$  representa las variaciones de anchura a lo largo del canal,  $S_0$  es la pendiente de fondo del canal  $S_0 = -\frac{\partial z}{\partial x}$ ,  $z$  representa el fondo del canal y  $S_f$  es el término fuente que hace referencia al rozamiento del agua con el contorno del canal, gobernado por la ley empírica de Manning  $S_f = \frac{Q^2 n^2}{A^2 R_h^{4/3}}$ , siendo  $R_h$  el radio hidráulico y  $n$  el coeficiente de rozamiento de Manning.

Estas ecuaciones se simplifican en el caso de canales rectangulares de anchura  $b=\text{cte}$  como es el caso, ya que se cumple  $A=bh$ ,  $I_1=\frac{1}{2}bgh^2$ ,  $I_2=0$  donde  $h$  es el calado o altura de la lámina de agua.

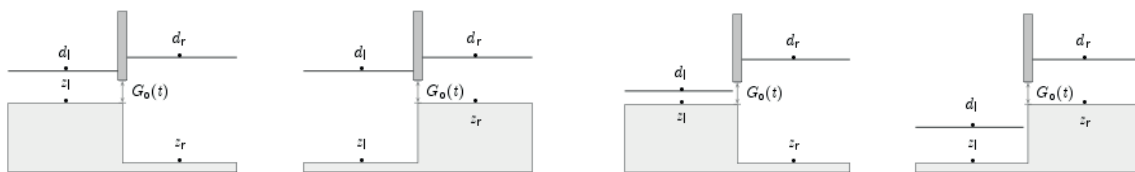
## Formulación de las compuertas

Las compuertas transversales están modeladas siguiendo Morales-Hernández *et al.* (2013a). Se supone que el caudal por unidad de ancho  $q$  que atraviesa la compuerta está gobernado por la diferencia de la cota del nivel de agua ( $d=h+z$ ) a los dos lados de la misma. Definiendo el nivel aguas arriba de la compuerta como  $d_r$ , el nivel aguas abajo como  $d_l$  y la apertura de la compuerta  $G_0$ , se pueden dar distintas situaciones en función de los valores relativos  $G_0$ ,  $z_r$ ,  $z_l$ ,  $d_l$  y  $d_r$ .

Cuando  $G_0 + \max(z_r, z_l) < \min(d_r, d_l)$  (Figura 1), el caudal que atraviesa la compuerta viene dado por la expresión

$$Q_g = BG_0 K_1 \sqrt{d_r - d_l} \quad (3)$$

La constante  $K_1$  aglutina la constante implícita en este tipo de fórmulas  $\sqrt{2g}$  además de las pérdidas de energía y en canales rectangulares se utiliza  $K_1=3.33$  (Morales-Hernández *et al.*, 2013). Esta situación es conocida en la literatura como flujo sumergido.



**Figura 1 |** Esquema de situaciones posibles en las compuertas transversales: condición de flujo sumergido (izquierda) y libre (derecha). El flujo circula de derecha a izquierda.

La posibilidad contraria ( $G_0 + \max(z_l, z_r) > \min(d_l, d_r)$ ) contempla la situación conocida como flujo libre (Figura 1), con la particularidad de que el caudal viene dado por el nivel aguas arriba de la compuerta únicamente

$$Q_g = BG_0 K_2 \sqrt{d_r - \max(z_l, z_r)} \quad (4)$$

con  $K_2$  otro parámetro empírico (que incluye igualmente  $\sqrt{2g}$ ) que en el caso de canales de sección constante rectangular tiene el valor de  $K_2 = 2.25$ .

Es importante tener en cuenta que en este trabajo, la formulación de las compuertas transversales no está sujeta a calibración como en el caso reportado en Lozano *et al.*, 2009. En las siguientes secciones se detallan las razones de esta decisión y se asume por tanto, que la sensibilidad del error de las medidas está afectada principalmente por los errores derivados de una mala interpretación del funcionamiento de la toma lateral. Además, el caudal que atraviesa las compuertas laterales usadas en este trabajo se supone gobernado únicamente por el nivel del agua en el interior (régimen libre). Su formulación es similar a (4) pero teniendo en cuenta que las tomas laterales vierten agua sobre un dissipador de energía que está a una cota  $z_0$  inferior que la del canal principal  $z$ , por lo que  $z = \max(z, z_0)$  y el caudal de descarga sobre la toma se puede formular como condición de flujo libre:

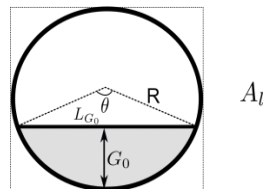
$$Q_l = \alpha A_l K_2 \sqrt{h_l} \quad (5)$$

donde  $h_l = d - z$  es el calado existente aguas arriba de la compuerta, es decir en el canal (en la zona de la compuerta),  $A_l$  es el área efectiva de flujo y  $\alpha$  es una constante a determinar en este trabajo, que hará referencia a las pérdidas relativas a la compuerta

En el caso de estudio que nos afecta, las compuertas laterales tienen una sección circular, por lo que una vez proporcionada la apertura de dicha compuerta será necesario calcular correctamente el área efectiva de flujo  $A_l$  (Figura 2)

$$A_l = \frac{\pi R^2 \theta}{360} - \frac{L_{G_0} (R - G_0)}{2} \quad (6)$$

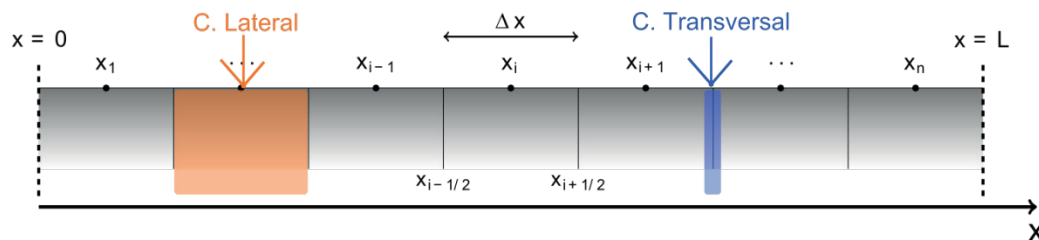
donde  $R$  es el radio del círculo,  $L_{G_0}$  es la cuerda y  $\theta$  es el ángulo que define la apertura  $G_0$ .



**Figura 2** | Área efectiva de flujo en una compuerta lateral de sección circular para una apertura  $G_0$ .

## Resolución numérica de las ecuaciones

El sistema de ecuaciones (1) se resuelve utilizando métodos numéricos en volúmenes finitos. Éstos consisten en discretizar nuestro dominio de longitud  $L$  en un número  $N$  de celdas de cálculo de tamaño  $\Delta x$  (ver Figura 3).



**Figura 3** | Discretización en volúmenes finitos. Se detalla en naranja la toma lateral asumida en la propia celda y en azul la compuerta transversal apoyada en la intercelda.

La linealización de Roe (Burguete y García-Navarro, 2004) permite obtener un Jacobiano linealizado en cada pared de cálculo  $i+1/2$ , cuya base de valores propios  $\tilde{\lambda}_{i+1/2}^m$  y vectores propios  $\tilde{\mathbf{e}}_{i+1/2}^m$  expresan la diferencia en el vector de variables conservadas y de términos fuente. Las variables “tilde” representan los estados promedio en cada pared de cálculo. Asumiendo una representación de las variables constantes a trozos e integrando desde el tiempo  $t^n$  al tiempo  $t^{n+1}$  es posible expresar la resolución numérica mediante (Morales-Hernández *et al.* 2013b):

$$\mathbf{U}_i^{n+1} = \mathbf{U}_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[ \left( \sum_m \tilde{\lambda}_+^m \tilde{\mathbf{e}}^m \right)_{i-1/2} + \left( \sum_m \tilde{\lambda}_-^m \tilde{\mathbf{e}}^m \right)_{i+1/2} \right]^n \quad (7)$$

El significado de la expresión (7) es simple: cada celda de cálculo  $i$  será actualizada según las contribuciones de flujos y términos fuente de las paredes de cálculo izquierda y derecha (ver Figura 4).

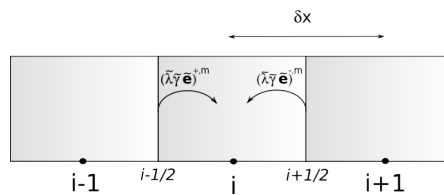


Figura 4 | Boceto del esquema numérico 1D.

Debido a que se trata de un esquema explícito, el paso de tiempo está restringido por la condición de Courant-Friedrich-Lewy (CFL):

$$\Delta t = \text{CFL} \min_{i,m} \left( \frac{\Delta x}{|\tilde{\lambda}_m|_i^n} \right), \quad \text{CFL} \leq 1 \quad (8)$$

La presencia de estructuras hidráulicas tiene que ser considerada en el esquema numérico. Para ello, distinguiremos entre compuertas transversales y laterales.

- Las compuertas transversales se suponen situadas entre dos celdas de cálculo  $i$  e  $i+1$  y se asocian por tanto a la pared  $i+1/2$  (ver Figura 3, detalle azul) Una vez calculado  $Q_g$  con (3) o (4), este valor se impondrá en las celdas  $i$  e  $i+1$ , asegurando la conservación. Si la apertura de la compuerta es  $G_0=0$ , el caudal que la atraviesa es nulo y la compuerta se comporta como una pared vertical infinitamente alta (no está contemplado el flujo por encima de la compuerta). Si la apertura de la compuerta es mayor que los dos niveles a izquierda y derecha de la misma, la compuerta queda sin efecto, recuperándose el esquema descrito en (7).
- La compuerta lateral se asocia a la celda  $i$  (ver Figura 3, detalle naranja) y el caudal  $Q_l$  que atraviesa la compuerta será extraído en forma de masa de agua de la celda  $i$ , actualizando su área mojada como sigue  $A_i = A_i - \frac{Q_l \Delta t}{\Delta x}$

## MÉTODO DE CALIBRACIÓN

En la formulación del caudal en (5) que atraviesa las tomas laterales basada en la aproximación de flujo libre, se incluye el coeficiente  $\alpha$  que pretende reflejar aspectos complejos del flujo de forma simplificada. La calibración de este parámetro en nuestro caso se va a obtener utilizando el método de Monte Carlo a partir de una batería de datos de campo. La aplicación de los métodos de Monte Carlo es verdaderamente útil en aquellos casos en los que existe un número elevado de grados de libertad y la exploración de distintas posibilidades puede acotar la combinación óptima. El concepto de optimalidad viene dado por una función que permita cuantificar lo bueno o malo de unos resultados la cual está generalmente asociada a una función de error. Definimos por tanto una función error  $J$  que es dependiente del estado del sistema  $\phi$  en espacio y tiempo:

$$\mathbf{J} \equiv \mathbf{J}(x, t, \phi) \quad (9)$$

Para el caso que nos ocupa, la función de error está relacionada con el estado del canal y en particular viene dado por la diferencia entre el calado calculado  $h_i(t)$  y el calado observado  $H_i(t)$ . Esta función la vamos a definir de manera formal como sigue

$$\mathbf{J} = \sqrt{\frac{\sum_{t=0}^{n_s} (h_i(t) - H_i(t))^2}{n_s}} \quad (10)$$

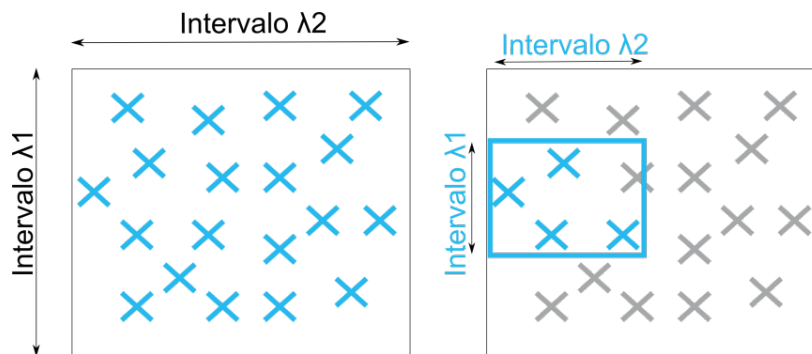
donde  $n_s$  es el conjunto de puntos de medida. Esta definición de  $\mathbf{J}$  se corresponde con la del Error Cuadrático Medio (más conocido como *RMSE* del *Root Mean Square Error* en inglés). Se ha elegido esta función porque permite tener en cuenta los valores de todos los puntos de medida de manera ponderada. En particular, se va a asignar a cada una de las sondas el mismo peso.

## Implementación

La implementación del método de Monte Carlo que hemos utilizado en este trabajo se llama *calibrator* y se encuentra disponible para su libre uso y modificación en <https://github.com/jburguete/calibrator>. Esta aplicación utiliza otro programa externo. En este caso, el que contiene el modelo matemático (Morales-Hernández et al., 2013b) implementado para resolver la evolución hidrodinámica del canal.

Este algoritmo lanza  $n_{sim}$  simulaciones, cada una de ellas con un conjunto de  $A=(\lambda_1, \dots, \lambda_{np})$  parámetros variables acotados. Una vez simulado y obtenido el error asociado a esta simulación, se eligen los mejores conjuntos de parámetros  $\tilde{\lambda}$  como un subconjunto de los primeros y se redefinen los intervalos para cada una de las variables de manera que el máximo y mínimo de cada subintervalo coincida con el máximo y mínimo de cada una de las variables de  $\tilde{\lambda}$ .

Para ilustrar el funcionamiento del algoritmo anterior, supongamos la búsqueda de dos parámetros  $A=(\lambda_1, \lambda_2)$  con un intervalo inicial  $I=(i_1, i_2)$ . En la parte derecha de la Figura 5 se eligen de manera aleatoria 19 conjuntos de parámetros y se realizan 19 simulaciones con cada uno de estos conjuntos. Finalizadas estas simulaciones, se mide el error y se eligen los  $n_{best}=4$  mejores parámetros en función del error.



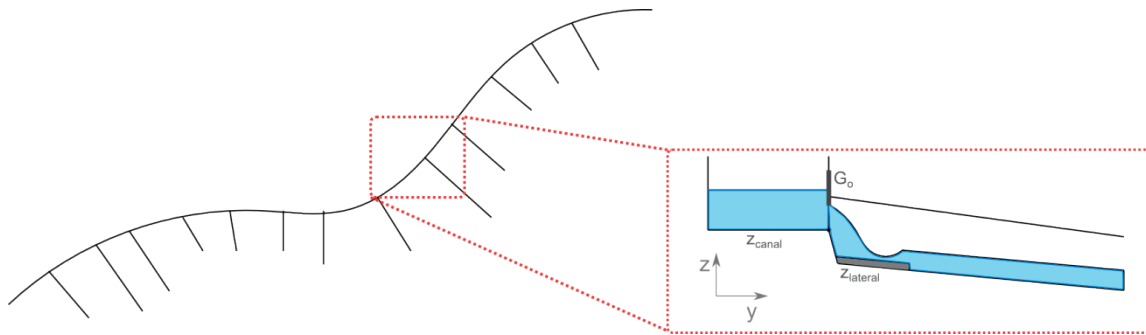
**Figura 5 |** Primera iteración para el método de Monte Carlo para calibración de dos variables (izquierda). Selección de las 4 mejores opciones (derecha).

Elegidos estos cuatro parámetros se redefine el intervalo, teniendo en cuenta el máximo y el mínimo de los valores de estos cuatro conjuntos de parámetros y se procede con la siguiente iteración. Este proceso se repite hasta que se alcanza el número de iteraciones definido en el fichero de entrada. Es importante encontrar un compromiso entre el número de iteraciones y el número de simulaciones ya que, de manera global, el coste del método requerirá un total de  $n_{iter} \cdot n_{sim}$  simulaciones.

## CASO DE ESTUDIO

El canal que se usará como objeto de estudio en este trabajo está situado en el término municipal de Pina de Ebro, localidad perteneciente a la provincia de Zaragoza y ha sido reformado en los últimos años en virtud de un plan de modernización de regadíos. Está equipado con sensores de profundidad de agua y registradores de apertura de compuertas que ayudan en la validación de la reconstrucción computacional de los escenarios.

El canal de riego objeto del trabajo tiene una longitud total de 12334 km con una pendiente variable y sección rectangular con una altura de 1.8 m y una anchura de  $b=2.5$  m y está regulado por cuatro compuertas transversales y diecinueve compuertas laterales de sección circular. Cada una de las compuertas laterales está conectada a una red secundaria de tuberías de 300 mm de radio (Lacasta *et al.*, 2014). Las condiciones de descarga pueden ser consideradas como flujo libre y la simulación de la dinámica en las tuberías no se realiza. Esta situación está ilustrada en la figura 6 con una diferencia de cota entre  $z_{canal}$  y  $z_{lateral}$  mayor de 0.6 m, la cual justifica esta hipótesis.

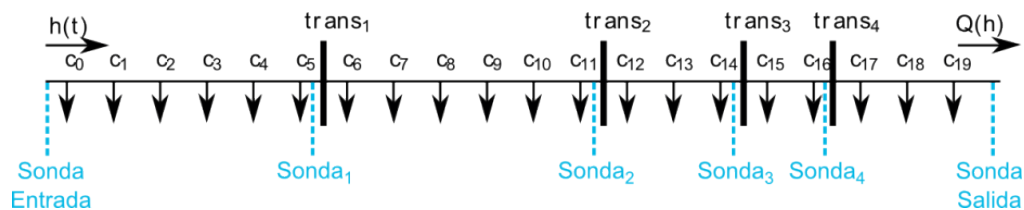


**Figura 6** | Esquema de la disposición de la toma lateral en el canal de estudio (derecha) junto a una representación artística del mismo (izquierda).

El proceso de modernización realizado en 2009 permitió instalar instrumentos de monitorización a lo largo del canal. Gracias a ello existe información, recogida con una frecuencia de diez minutos, de los distintos elementos que conforman el canal:

- Movimientos de las compuertas laterales
- Movimientos de las compuertas transversales
- Sonda de calado en la entrada
- Sonda de calado en la salida
- Sonda de calado aguas arriba de cada una de las compuertas transversales

La Figura 7 recoge de manera esquemática la posición relativa de las compuertas transversales y laterales dentro del canal, así como los diferentes puntos de monitorización.



**Figura 7** | Estructura del canal incluyendo localización de sondas.



Debido a la instrumentación del canal, existen datos históricos en continuo desde la creación del mismo. En particular, hemos utilizado el periodo de 2012 y 2013 en la calibración. En la Figura 8 aparecen los movimientos de todas las compuertas laterales para ambos periodos. Esta figura se debe interpretar como una secuencia temporal para cada compuerta (numeradas en el eje y) de estados abierto o cerrado. En adelante, se deberá tener en cuenta que este estado aparece de color naranja solamente si para el periodo de interés se ha producido algún cambio de estado.

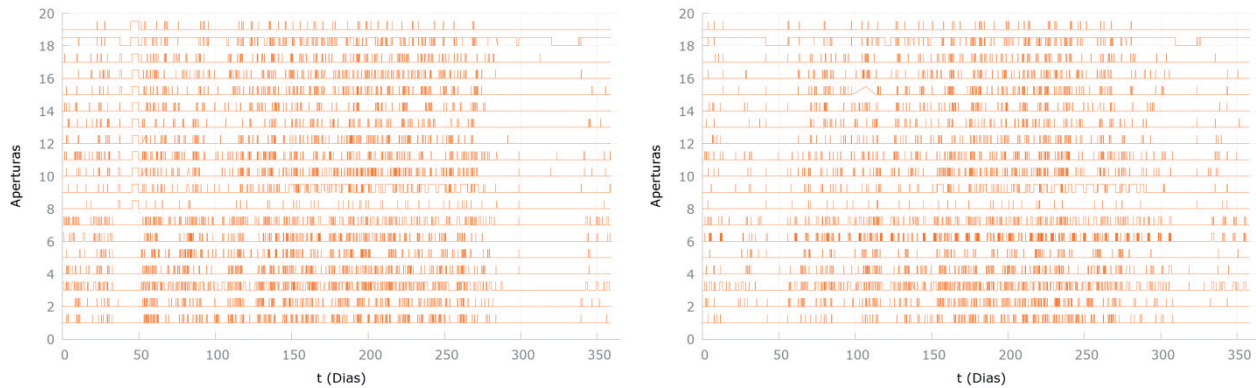


Figura 8 | Movimientos para el periodo 2012 (izquierda) y 2013 (derecha) de las compuertas laterales del canal.

## Calibración

El objetivo principal de este trabajo es calibrar los coeficientes de las diecinueve compuertas laterales existentes en el canal. Para ello vamos a utilizar la información proporcionada por el equipo de monitorización del canal correspondiente a los años 2012 y 2013. En esta información, es posible consultar los niveles de agua (calado) a la entrada y a la salida del canal, así como los movimientos de todas las compuertas laterales, lo que permite aislar los casos que se pueden utilizar para calibrar las compuertas. Además es posible generar los datos en el formato necesario para la simulación del escenario correspondiente. Para simplificar el estudio, se ha asumido que las compuertas transversales no introducen error en el modelo, lo cual permite acotar la fuente de incertidumbre y mejorar el rendimiento del modelo. En cualquier caso y como se aprecia en los resultados del estudio, el error es altamente sensible al movimiento de las compuertas laterales, por lo que una buena calibración de éstas debería acercar el carácter predictivo del modelo en su conjunto.

El procedimiento seguido para la calibración de una compuerta se puede resumir en dos pasos. En primer lugar es necesario encontrar en la información proporcionada por el equipo de monitorización del canal, un periodo de tiempo en el que la compuerta a calibrar esté actuando sola. Es necesario además que ese movimiento de la compuerta repercuta de manera significativa en las sondas del canal, es decir, que las sondas muestren sensibilidad a esos movimientos. Una vez tenemos un escenario apropiado, se simula el caso elegido con el fin de calibrar la compuerta aislada en la que existe el movimiento, utilizando el algoritmo de Monte Carlo explicado en la sección *Método de calibración* de este trabajo y obteniendo como resultado un coeficiente  $\alpha$  (ecuación 5) para la compuerta.

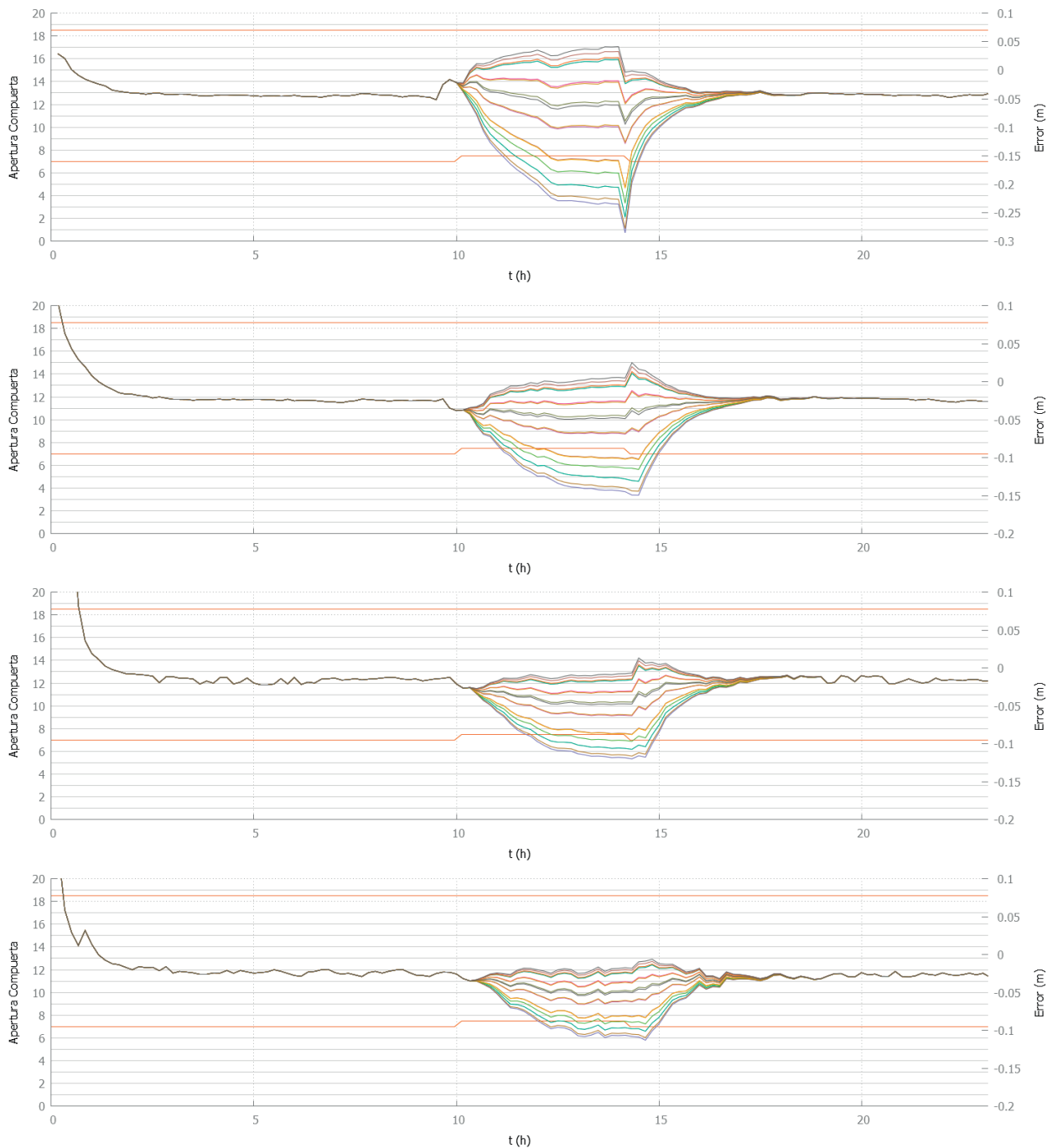
Mostramos un ejemplo del proceso de calibración de la compuerta lateral número 7. El periodo de tiempo apropiado se ha identificado como el intervalo entre las 00:00 y las 23:55 del día 19/12/12.

Se puede obtener el error total, calculado como la suma ponderada de los errores en cada una de las sondas de las compuertas transversales y la salida. En concreto, el error contiene las contribuciones de las cinco sondas como sigue:

$$\mathbf{J} = \frac{1}{\sqrt{5}} \left( (h_{\text{sonda1}}(t) - H_{\text{sonda1}}(t))^2 + (h_{\text{sonda2}}(t) - H_{\text{sonda2}}(t))^2 + (h_{\text{sonda3}}(t) - H_{\text{sonda3}}(t))^2 + (h_{\text{sonda4}}(t) - H_{\text{sonda4}}(t))^2 + (h_{\text{salida}}(t) - H_{\text{salida}}(t))^2 \right)^{1/2} \quad (12)$$

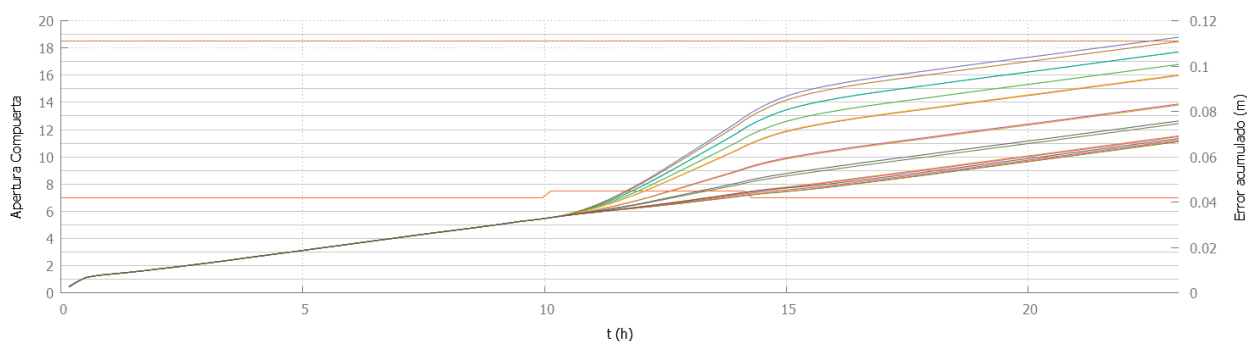


Los resultados de la primera iteración de Monte Carlo para las sondas correspondientes a las compuertas transversales (1, 2, 3 y 4) y a la sonda de salida están recogidos en la Figura 9.



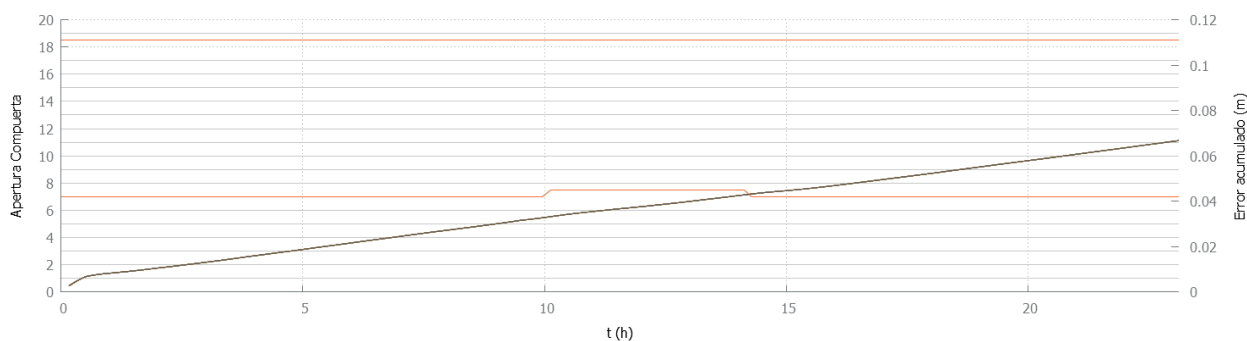
**Figura 9** | Caso compuerta 7: En orden descendente, errores para la sonda 1, 2, 3, 4 y salida para la primera iteración del método de Monte Carlo.

La Figura 10 muestra dos informaciones. Por un lado el eje y principal indica los movimientos de las compuertas para este intervalo de tiempo (en particular, el movimiento de la compuerta 7) y por otro lado, en el eje y secundario, los valores que va acumulando  $J$  en el tiempo en la primera iteración de Monte Carlo para cada valor de  $\alpha$  probado por el método dentro del intervalo. De manera inicial, el método de Monte Carlo prueba valores en el intervalo (0,1).



**Figura 10** | Caso compuerta 7: Error total en la primera iteración.

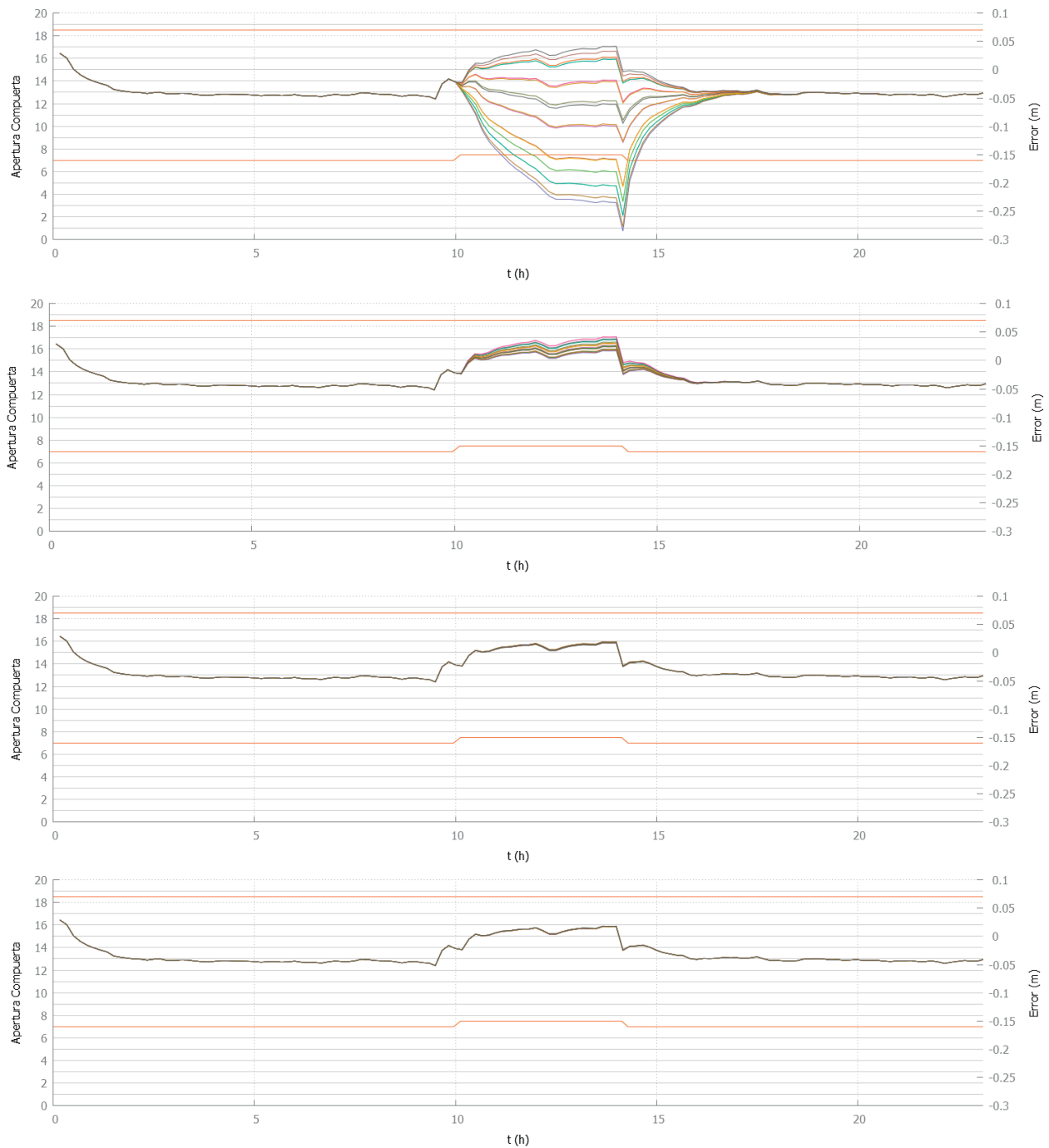
Si bien es cierto que el ajuste ideal se corresponde con la convergencia a un error cero, en Li *et al.*, 2005 se muestra como errores en elementos aguas arriba son propagados (y amplificados) aguas abajo. El resultado es un incremento de éste en el tiempo. Estos casos muestran una tendencia asintótica lineal en el caso calibrado (ver cuarta iteración en la Figura 11).



**Figura 11** | Caso compuerta 7: Error total en la cuarta iteración.

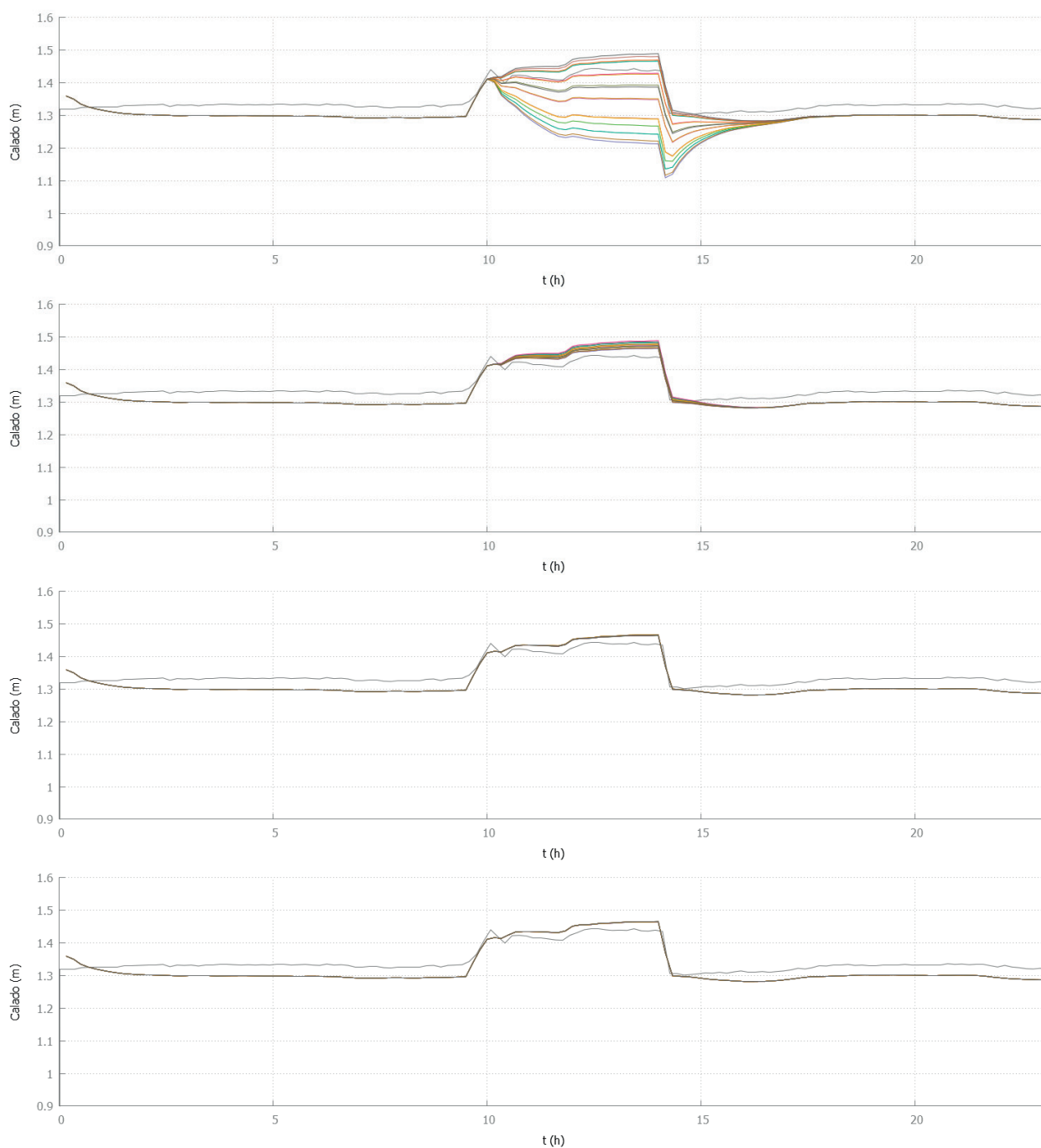
Esto significa que existen o bien errores de offset en las sondas de medida o bien existen errores sistemáticos en la calibración de las compuertas transversales. Idealmente, sin estos offsets, el error debería converger a cero pero debido a estos errores sistemáticos en las medidas, se entenderá que el método de Monte Carlo ha convergido siempre que no exista un cambio de tendencia en la curva del error. En otras palabras, se demuestra que el movimiento de la compuerta no introduce ningún error cuando el error tiene sensibilidad cero al movimiento, lo que se traduce en que la tendencia no varía una vez se produce esta apertura.. Como se aprecia en la Figura 11 y a diferencia de la Figura 10 no existe ningún cambio de tendencia una vez se abre la compuerta. Esto es indicio de que el movimiento de la compuerta no modifica la función error y por tanto puede considerarse calibrada.

Para seguir en detalle la evolución de los errores, la Figura 12 muestra la correspondiente a la sonda 2 en las 4 iteraciones siguientes. En este caso, el error converge a un valor mucho más pequeño que el que se encuentra en el primer intervalo, produciendo un comportamiento asintótico en el error total como es esperable. Es además destacable el hecho de que la mejora que la convergencia del método de Montecarlo a partir de las 3 primeras iteraciones comienza a ser menor, pudiéndose observar en la figura 12 como la diferencia entre la iteración 3 y 4 es apenas imperceptible a simple vista.



**Figura 12** | Caso compuerta 7: En orden descendente, errores para la sonda 2 para las cuatro primeras iteraciones de Monte Carlo.

Para comprobar de manera visual y cualitativa la convergencia al mínimo error respecto de los datos medidos, la Figura 13 muestra la evolución en el nivel de agua para las cuatro primeras iteraciones de Monte Carlo, en la que se aprecia perfectamente como el ajuste en el parámetro de la compuerta 7 hace que el resultado de la sonda 2 se acerque cada vez más a la medición de la propia sonda. El resumen de la calibración de la compuerta 7 sería:



**Figura 13** | Caso compuerta 7: En orden descendente, nivel en función del tiempo para la sonda 2 para las cuatro primeras iteraciones de Monte Carlo.

Por último, se obtienen unos resultados en forma de gráficas de la calibración realizada anteriormente, en las que en primer lugar aparece representado el error cometido respecto al periodo de tiempo del caso elegido en cada una de las sondas, (excepto en la entrada) e incluyendo el error total, es la representación del método de Montecarlo. Las figuras del error total mediante las cuales se obtiene el coeficiente de calibración es la suma ponderada de los errores en cada una de las sondas y en salida. Posteriormente una vez obtenido el coeficiente aparece la comparación entre los datos de calado medidos y los datos de calado simulados ambos representados para el periodo de tiempo del caso elegido y para cada una de las sondas incluyendo la salida. El detalle de la calibración de cada una de las compuertas está condensado en la Tabla 1.

**Tabla 1** | Coeficientes para las 19 compuertas.

Nombre	Fecha Inicio	Fecha Fin	Movimientos	Observaciones	Coefficiente
7	19/12/2012 0:00	19/12/2012 23:55	7.18	Ninguna	<b>0.2211</b>
12	18/10/2012 5:25	18/10/2012 19:50	12.18	Ninguna	<b>0.4916</b>
11	26/12/2012 0:00	26/12/2012 23:55	11.18	Ninguna	<b>0.6067</b>
14	05/12/2013 0:00	05/12/2013 23:55	14.18	Ninguna	<b>0.2152</b>
4	11/12/2013 6:00	11/12/2013 14:00	4.18	Ninguna	<b>0.2470</b>
18	21/11/2013 23:55	22/11/2013 23:55	18	Ninguna	<b>0.3072</b>
13	16/01/2012 14:00	16/01/2012 23:00	13.18	Ninguna	<b>0.3071</b>
16	20/01/2012 0:00	20/01/2012 8:30	16.18	Ninguna	<b>0.1665</b>
3	20/12/2012 4:00	19/12/2012 23:55	3,18,11	Compuerta 11 previamente calibrada	<b>0.3441</b>
8	28/02/2013 0:00	01/03/2013 22:55	8,18,11	Compuerta 11 previamente calibrada	<b>0.7337</b>
17	09/01/2013 0:00	09/01/2013 23:55	17,18,3	Compuerta 3 previamente calibrada	<b>0.6758</b>
6	24/12/2012 0:00	24/12/2012 23:55	6,18,9,11	Compuertas 9,11 previamente calibradas	<b>0.6764</b>
5	05/10/2012 12:25	05/10/2012 14:30	5,18,7,13	Compuertas 7,13 previamente calibradas	<b>0.4432</b>
15	12/12/2012 0:00	12/12/2012 23:55	15,18,2,10	Compuertas 2, 10 previamente calibradas	<b>0.2648</b>
9	05/04/2013 0:00	05/04/2013 14:50	9,18,8	Compuerta 8 previamente calibrada	<b>0.1665</b>
1	19/05/2012 0:00	19/05/2012 4:50	1,18,12	Compuerta 12 previamente calibrada	<b>0.2652</b>
2.10	23/10/2013 0:00	23/10/2013 23:55	10,18,2,4,7,11,14	Compuertas 4, 7, 11, 14 previamente calibradas	<b>0.1357</b>
					<b>0.2696</b>

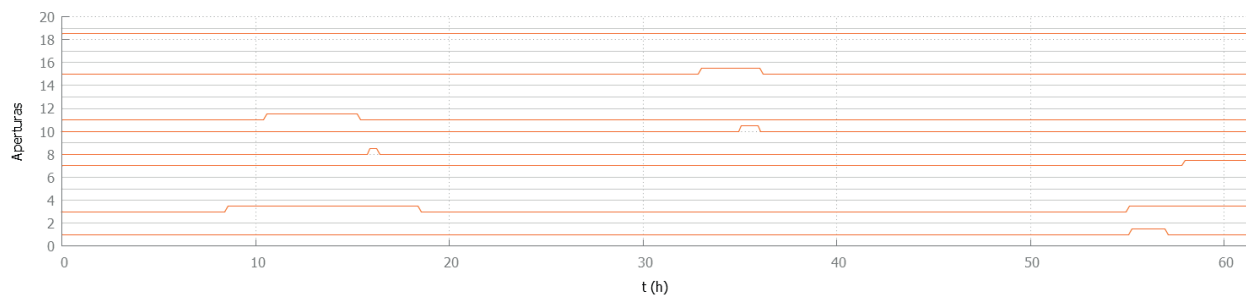
## Validación

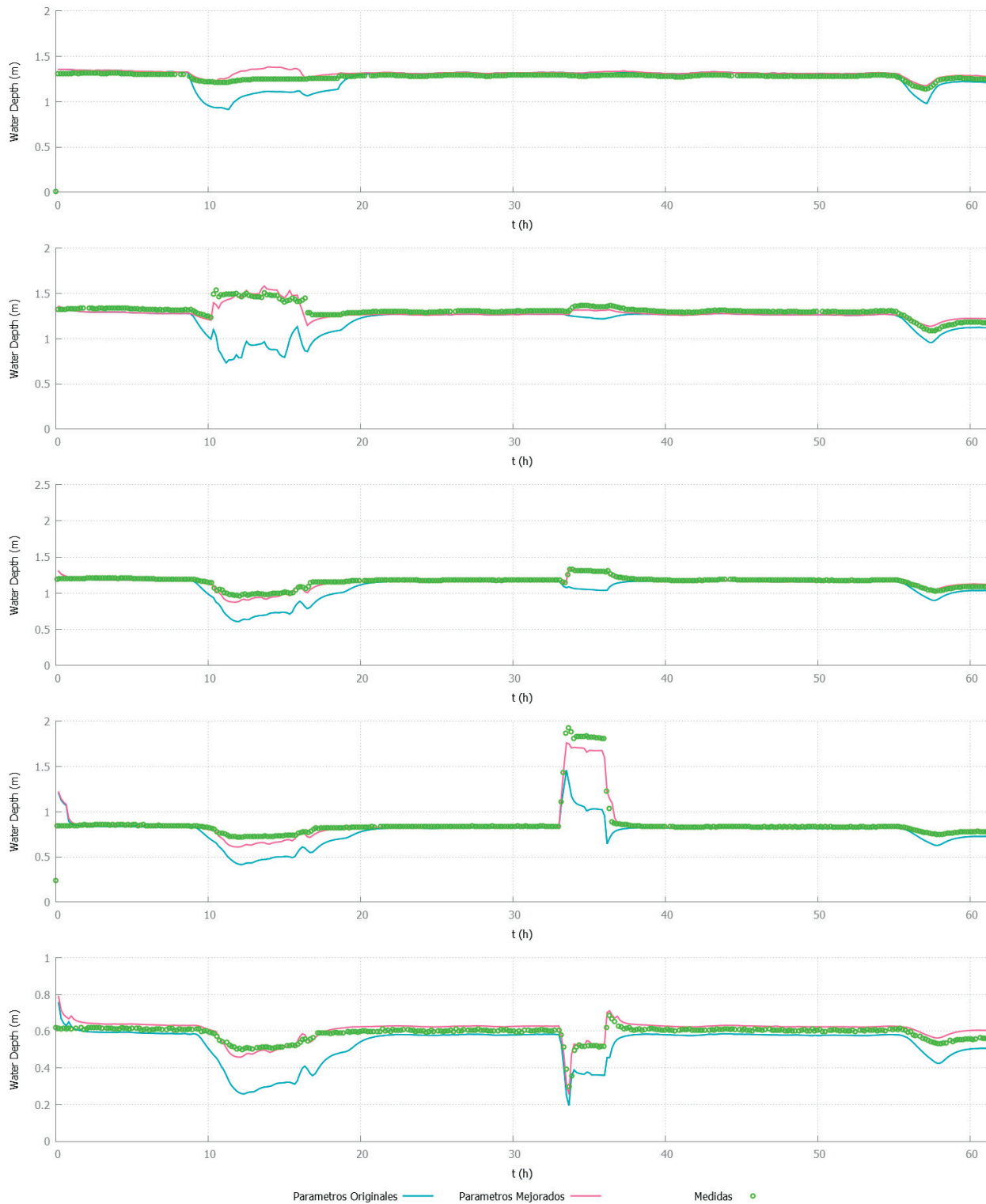
Se ha seleccionado un conjunto representativo de casos para proceder con la validación del modelo. El objetivo es verificar que los coeficientes hallados en la fase de calibración son correctos. El procedimiento seguido para validación de la calibración de las compuertas laterales es el siguiente:

- Encontrar en la información proporcionada por el equipo de monitorización del canal un periodo de tiempo en el que actúen varias compuertas.
- Simular el modelo del caso elegido.
- Interpretación de los resultados obtenidos de la simulación del modelo.

En este proceso se analizan las diferencias entre los resultados que produce la formulación correspondiente a  $\alpha=1$  (es decir, las pérdidas son las mismas que para sección rectangular) y las calibradas con los nuevos valores de  $\alpha$ . Además aparecen representados los datos de calado medidos para el periodo de tiempo del caso elegido y para cada una de las sondas, incluyendo la salida.

Para ilustrar este proceso se muestran a continuación los resultados de dos casos. El caso 1 simula el estado del canal para el periodo (20/12/2012 0:00-22/12/2012 13:45) en la que se producen movimientos en las compuertas 1,3,7,8,10,11,15,18 como se ve en la Figura 14. Con estos datos se simula este evento con las compuertas calibradas y sin calibrar. El detalle de estos resultados está en la Figura 15.

**Figura 14** | Caso 1: Aperturas de las compuertas.



**Figura 15** | Caso 1: Resultados para las sondas 1, 2, 3, 4 y salida.

El caso dos es más complicado por que interviene un número más elevado de compuertas. El evento simulado incluye el intervalo (13/03/2013 (00:00) - 17/03/2013 (12:00)) en el que se contemplan movimientos de las compuertas 1,2,3,4,6,7,11,12,13, 14,15,16,17,18. Análogamente al caso anterior, los movimientos de las compuertas en la figuras 16 y los resultados en la figura 17.



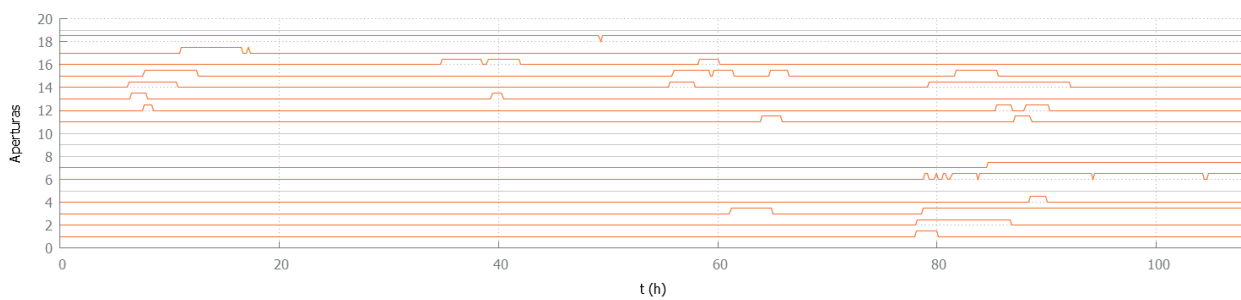
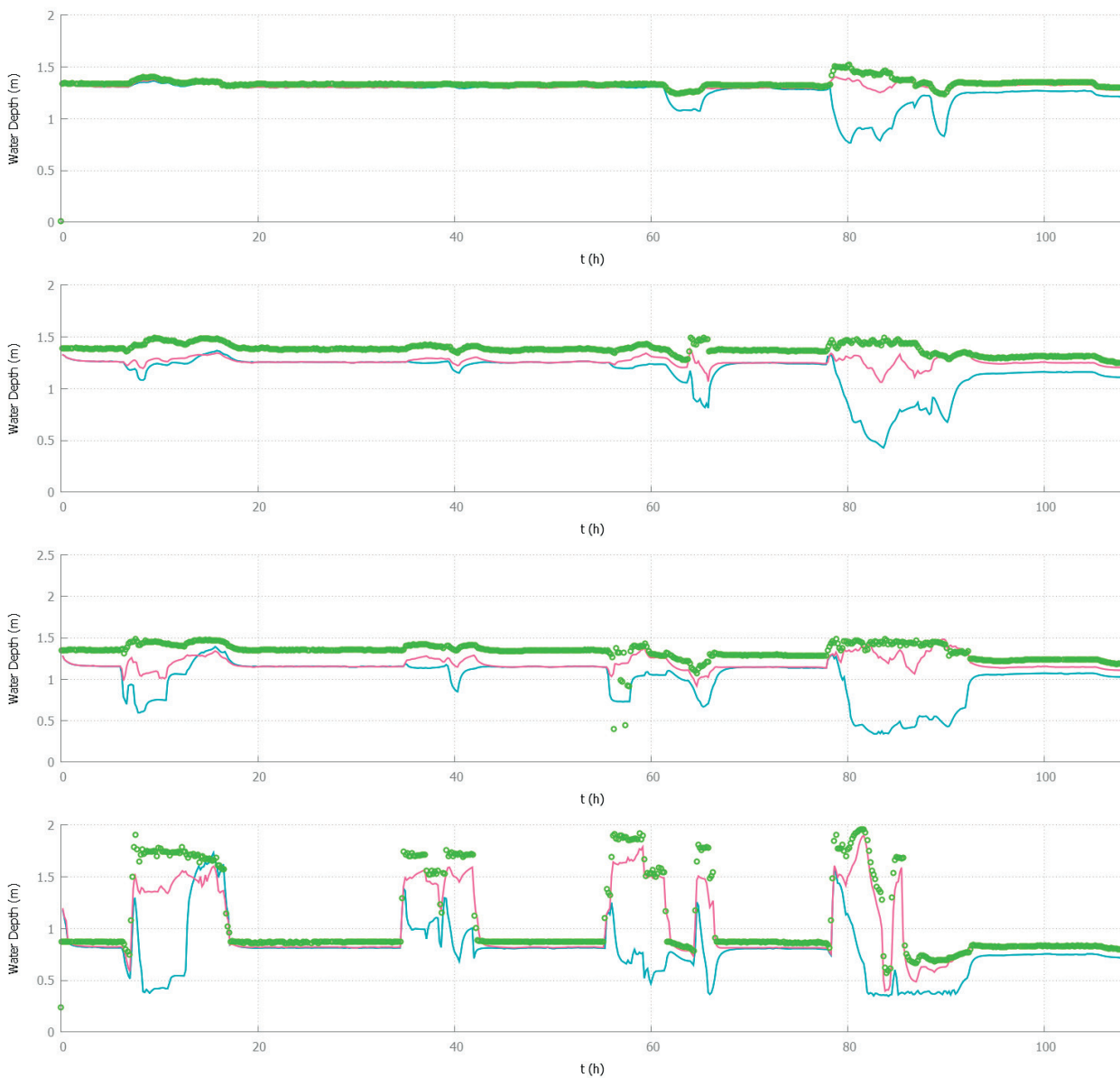
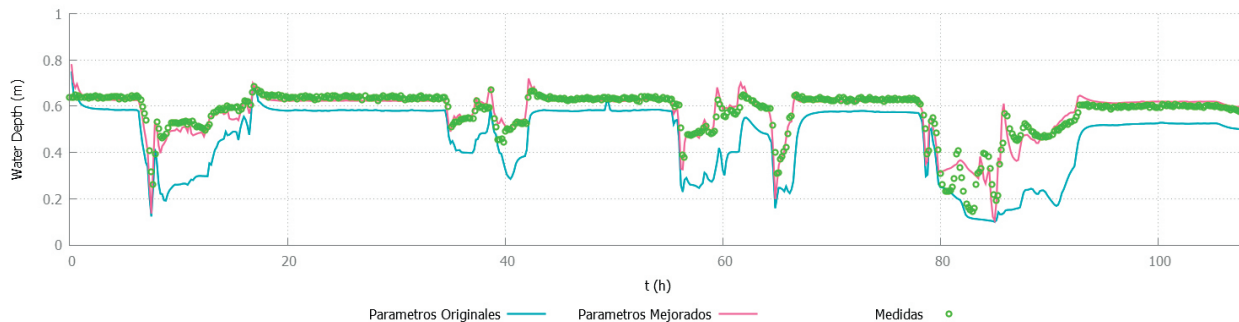


Figura 16 | Caso 2: Aperturas de las compuertas.



(sigue en la página siguiente)



**Figura 17** | Caso 2: Resultados para las sondas 1, 2, 3, 4 y salida.

En este caso, aparece un sesgo importante entre la medida de la sonda 2 y 3 y la simulación. La causa es el posible desajuste de las sondas de medida durante la campaña de limpieza del canal. Este tipo de actuaciones es frecuente y pone de manifiesto la corrección de offset que debería incluirse en las medidas de las sondas. Los autores han decidido no hacerlo en este caso para ilustrar un fenómeno común con el que los usuarios de este tipo de modelos suelen encontrarse. En su conjunto, el resultado de la calibración produce un comportamiento en la dinámica del canal mucho más próximo a la real. Atendiendo a los resultados de los casos de verificación, se puede considerar que las compuertas están suficientemente bien calibradas y esto permite obtener de manera predictiva las variables características del canal (nivel y caudal).

## CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo se ha llevado a cabo un proceso de calibración, mediante el simulador desarrollado por el grupo de Hidráulica Computacional de la Universidad de Zaragoza, del algoritmo de Monte Carlo. Esta calibración se ha realizado a partir de los datos proporcionados por los sensores de medida del canal. Con el objetivo de calibrar unos determinados coeficientes asociados a las pérdidas en las compuertas laterales del canal, ha sido necesaria la elección y aislamiento de eventos registrados adecuados para este proceso.

El modelo computacional está basado en un esquema descentrado en volúmenes finitos, que se usa para resolver numéricamente las ecuaciones de aguas poco profundas unidimensionales. Este simulador incluye internamente el tratamiento numérico de las compuertas laterales y transversales y permite reproducir el comportamiento del flujo y su interacción con estos elementos. En este caso, se ha generado un modelo computacional del canal de Pina de Ebro (Zaragoza) sobre el que se ha realizado el proceso de calibración.

La calibración de las compuertas laterales es necesaria para lograr reducir al máximo las incertidumbres relacionadas con el modelo numérico que reproduce el comportamiento del canal y para dotar a la herramienta de un carácter predictivo. Para llevar a cabo este proceso de calibración se han elegido casos aislados en los que cada compuerta actúa de manera independiente y que producen unos cambios apreciables en las medidas experimentales proporcionadas por los sensores del canal. Mediante el Algoritmo de Monte Carlo se han obtenido unos coeficientes para cada una de esas compuertas, que posteriormente han sido validados satisfactoriamente en casos en los que existía movimiento de varias compuertas a la vez.

Los resultados obtenidos a partir de la reformulación de las ecuaciones de las compuertas laterales han mejorado los resultados que se obtienen con los parámetros estándar. Además, la calibración de los parámetros propios de esta formulación ha dado lugar a la generación de un modelo computacional del canal de riego de la Comunidad de Regantes de Pina de Ebro altamente predictivo. La metodología propuesta, así como la aplicación de este tipo de métodos para calibración ha permitido cumplir los objetivos inicialmente planteados en el trabajo de manera exitosa.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen la financiación del Ministerio de Ciencia e Innovación (BIA2011-30192-C02-01), a D. Angel Usón, gestor la Comunidad de Regantes de Pina de Ebro y a la empresa Riegosalz, S.L.

## REFERENCIAS

- Albertson, M. L., Dai, Y., Jensen, R. A., Rouse, H. (1950). Diffusion of submerged jets. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 115(1), 639-664.
- Burguete, J., García-Navarro, P. (2004). Improving simple explicit methods for unsteady open channel and river flow. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 45, 125-156. doi:10.1002/flid.619
- Burguete, J., Calibrator, <https://github.com/jburguete/calibrator>.
- Ferro, V. (2000). Simultaneous flow over and under a gate. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 126(3), 190-193. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2000)126:3(190)
- García-Navarro, P., Brufau, P., Murillo, J., Zorraquino, C. (2003). Estudio hidráulico del riesgo de inundación en el meandro de Ranillas: Modelos de simulación numérica. *Ingeniería del Agua*, 10, 115-125.
- Habibzadeh, A., Vatankhah, A. R., Rajaratnam, N. (2011). Role of energy loss on discharge characteristics of sluice gates. *Journal of Hydraulic engineering*, 137(9), 1079-1084. doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000406
- Henderson, F. M. (1996). Open channel flow. Macmillan. ISO 690
- Lozano, D., Mateos, L., Merkley, G. P., Clemmens, A. J. (2009). Field calibration of submerged sluice gates in irrigation canals. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 135(6), 763-772. doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000085
- Lacasta, A., Morales-Hernández, M., Brufau, P., García-Navarro, P. (2014). A simulation based tool for PID control in canals: application to the Pina de Ebro irrigation community. En *Proc. Cong. On Industrial & Agricultural Canals*, septiembre 2-5, Lleida, España.
- Li, Y., Cantoni, M., Weyer, E. (2005). On water-level error propagation in controlled irrigation channels. En *Proc. 44<sup>th</sup> IEEE Conf. on Decision and Control, and the Europ. Control Conf.*, Diciembre 12-15, Sevilla, España.
- Lin, C., Yen, J., Tsai, C. (2002). Influence of Sluice Gate Contraction Coefficient on Distinguishing Condition. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 128(4), 249-252. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2002)128:4(249)
- Morales-Hernández, M., García-Navarro, P., Burguete, J., Brufau, P. (2013a). A conservative strategy to couple 1D and 2D models for shallow water flow simulation. *Computers & Fluids*, 81, 26-44. doi:10.1016/j.compfluid.2013.04.001
- Morales-Hernández, M., Murillo, J., García-Navarro, P. (2013b). The formulation of internal boundary conditions in unsteady 2-D shallow water flows: application to flood regulation. *Water Resources Research*, 49(1), 471-487. doi:10.1002/wrcr.20062
- Pongput K., Merkley G. P., (1997). Comparison and calibration of canal gate automation algorithms. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 123(3), 222-225. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(1997)123:3(222)
- Rajaratnam, N., Subramanya, K. (1967). Flow equation for the sluice gate. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 93(3), 167-186.
- Shamir, U., Howard, C. D. D. (1968). Water Distribution Systems Analysis, En *Proc ASCE*, Vol. 94, No. HY1, 219-234
- Skogerboe, G. V., Merkley, G. P. (1996). *Irrigation maintenance and operations learning process*. Water Resources Publication.
- Swamee, P. K. (1992). Sluice-gate discharge equations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 118(1), 56-60. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(1992)118:1(56)

