

Modelación física del flujo a través de las compuertas radiales de la derivadora Cañar

Vicente Tinoco¹, Felipe Cisneros¹, Esteban Pacheco¹, Verónica Carrillo¹, Edison Calle², Juan Domínguez², Johana Garate², Katty Solís²

¹ Universidad de Cuenca, PROMAS, Departamento de Ingeniería Civil, Av. 12 de Abril Cdla. Universitaria, Cuenca, Ecuador.

² Universidad de Cuenca, Carrera de Ingeniería Civil, Av. 12 de Abril Cdla. Universitaria, Cuenca, Ecuador.

Autor para correspondencia: tinocovicente@ucuenca.edu.ec

Fecha de recepción: 21 de septiembre de 2014 - Fecha de aceptación: 17 de octubre de 2014

RESUMEN

La cuenca baja del río Cañar es una planicie costera con alto potencial hidro-económico. Sin embargo, esta zona es expuesta a grandes eventos de inundación. El gobierno ecuatoriano ha invertido en un proyecto de gran magnitud para control de inundaciones. Las alternativas de diseño requieren ser probadas en modelos físicos como soporte para los diseños finales. Las variables asociadas al flujo a través de las compuertas de la derivadora Cañar son investigadas en un modelo físico a escala. Los experimentos determinaron la curva de calibración de la compuerta, la ubicación idónea del muñón de la misma y la profundidad del cuenco disipador. Adicionalmente, se encontraron fenómenos de hoyas oscilantes con láminas de flujo de negativo que podrían producir socavación. Como solución, se recomienda modificar la geometría del talud de ingreso del cuenco disipador por una geometría ajustada al perfil de la descarga de chorro.

Palabras clave: Modelación hidráulica física, análisis dimensional, compuertas radiales.

ABSTRACT

The Cañar River lower basin is a coastal flat area with a high hydro-economic potential, however this zone is vulnerable to flooding. The Ecuadorian Government invests in a flood control project. The project design alternatives need testing in a physical model for supporting the final design. The variables related to the flow through the radial gates of the diversion works are investigated in a physical model. A discharge curve was calibrated for the gate operation. In addition, the best gate location was determined, as well as the optimum still basin depth. Unusual osculation with negative flow directions were found for specific tests. This phenomenon has a scour effect. In order to solve this problem, changes in the geometry of the still basin entrance are recommended by adjusting it to the flow profile.

Keywords: Hydraulic physic modelling, dimensional analysis, radial gates.

1. INTRODUCCION

La cuenca baja del río Cañar es una de las regiones hidro-económicas y ambientales con mayor potencial para el desarrollo del país; pero al ser una zona de planicie costera, está expuesta a graves problemas relacionados a los fenómenos hidrológico-torrenciales y de avenidas, que desbordan los cauces y que se traducen en eventos de inundación. En este sentido el gobierno ecuatoriano financió los estudios para una obra de control de inundaciones ubicada en el sector de Pancho Negro, Puerto

Inca; la cual contribuirá a mitigar estos problemas. En el diseño de obras hidráulicas de gran magnitud, el empleo de modelos físicos permite evaluar los diseños y determinar cuantitativa y cualitativamente variables que en muchos casos no es posible determinar matemáticamente.

El presente artículo resume la investigación experimental del comportamiento hidráulico del flujo a través de las estructuras de compuertas radiales que forman parte de la derivadora Cañar mediante modelación física con los caudales de diseño. El caudal de diseño del proyecto tiene un periodo de retorno de 50 años.

2. DESCRIPCION DEL PROYECTO

El río Cañar a la altura de Pancho Negro (Fig. 1) transporta un caudal pico de $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ con un período de retorno de 50 años. Aguas abajo de este punto, en la confluencia con el río Norcay este caudal puede ascender a $2100 \text{ m}^3/\text{s}$. Sin embargo la capacidad del río Cañar en Puerto Inca es de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ (PROMAS, 2011).

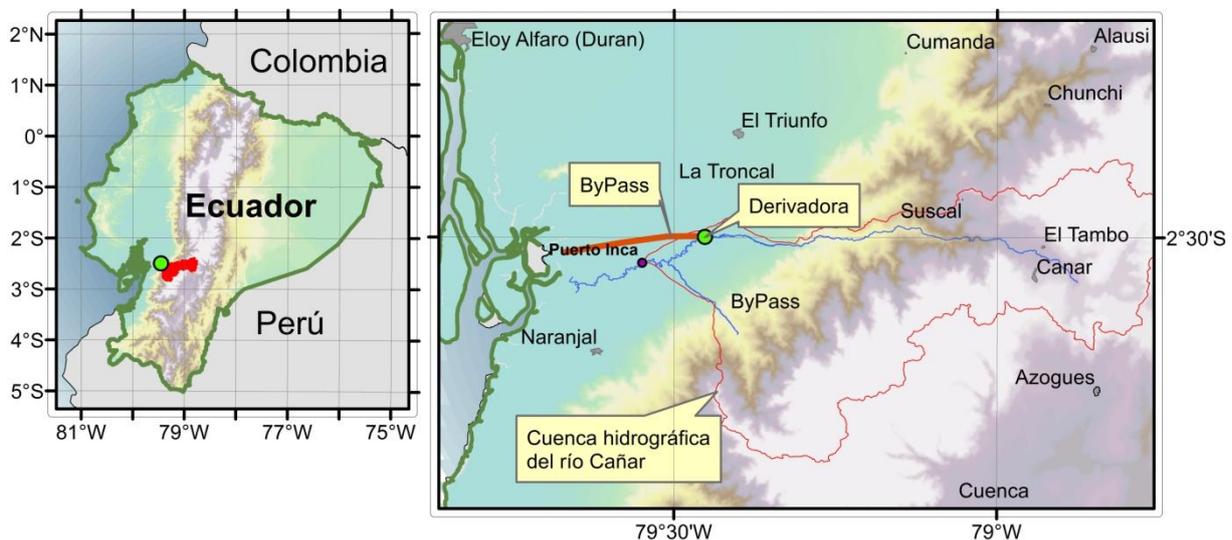


Figura 1. Ubicación del proyecto de control de inundaciones Cañar.

El sistema de control de inundaciones Cañar tiene por objeto controlar eventos hidrológicos extremos aguas abajo de Pancho Negro. El sistema comprende una derivadora, diques de protección a lo largo del río Cañar y de los afluentes principales, y un canal artificial entre Pancho Negro y el estero Soledad Grande. La derivadora consta de un sistema de 10 compuertas radiales y un azud. Las compuertas controlarían los caudales del río Cañar permitiendodescargas entre $400 \text{ m}^3/\text{s}$ a $800 \text{ m}^3/\text{s}$. De ésta forma el caudal después de la unión con el Río Norcay, en Puerto Inca se mantendría dentro de la capacidad del río. Los caudales excedentes son derivados por el canal artificial (Equipo Consultor, 2011).

3. METODOS

Las investigaciones experimentales en modelos físicos están basadas en conceptos hidráulicos, análisis dimensional y teoría de la similitud. Las condiciones de flujo de un modelo físico deben ser similares a la del prototipo, esto es posible si y solo si el modelo cumple con las similitudes: geométrica, cinemática y dinámica (Chanson, 2002). Parámetros adimensionales permiten que los resultados experimentales sean aplicados al prototipo. Un correcto diseño de la experimentación permite llevar a cabo menos, aunque altamente selectivos, experimentos con el fin de determinar las

variables asociadas al control del flujo y también lograr importantes ahorros de tiempo y dinero (Streeter *et al.*, 2000).

Los experimentos fueron realizados en un canal con paredes laterales de vidrio y dimensiones: 0.30m x 0.45m x 12.50m (BxHxL); ubicado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca.

3.1. Diseño y construcción del modelo físico

La compuerta de la derivadora Cañar es una estructura hidráulica con flujo de superficie libre, por lo que las fuerzas gravitacionales constituyen el parámetro predominante para el análisis dimensional. Basado en el teorema de Buckingham II (Buckingham, 1914), el parámetro adimensional independiente es el número de Froude (Fr). Es decir el número de Fren el prototipo es igual a Fr en el modelo.

El diseño del modelo físico de la compuerta fue realizado por ancho unitario a escala no distorsionada. La selección de la escala geométrica apropiada fue un proceso iterativo en función de las dimensiones del canal y de la capacidad máxima de la bomba instalada en el canal. La escala geométrica del modelo fue 1:20. Los caudales de diseño del prototipo investigados fueron: 400, 600 y 700 m³/s. Luego de escalar estos caudales para el modelo mediante similitud cinemática, resultaron en: 13.41, 20.13, y 23,48 l/s respectivamente.

Finalmente se verificó que no existan efectos de escala en el modelo. Esto significa que no existan efectos viscosos y de tensión superficial en la modelación que pudiesen afectar las fuerzas predominantes de gravedad. Para ello se comprobó que el número de Reynolds sea mayor a 30000 (Novak *et al.*, 2001).

El diseño de la estructura a escala de la compuerta y cuenco dissipador de energía se presenta en la Fig. 2a. La construcción se realizó en madera con lámina metálica en la cara frontal de la compuerta como se indica en la Fig. 2b.

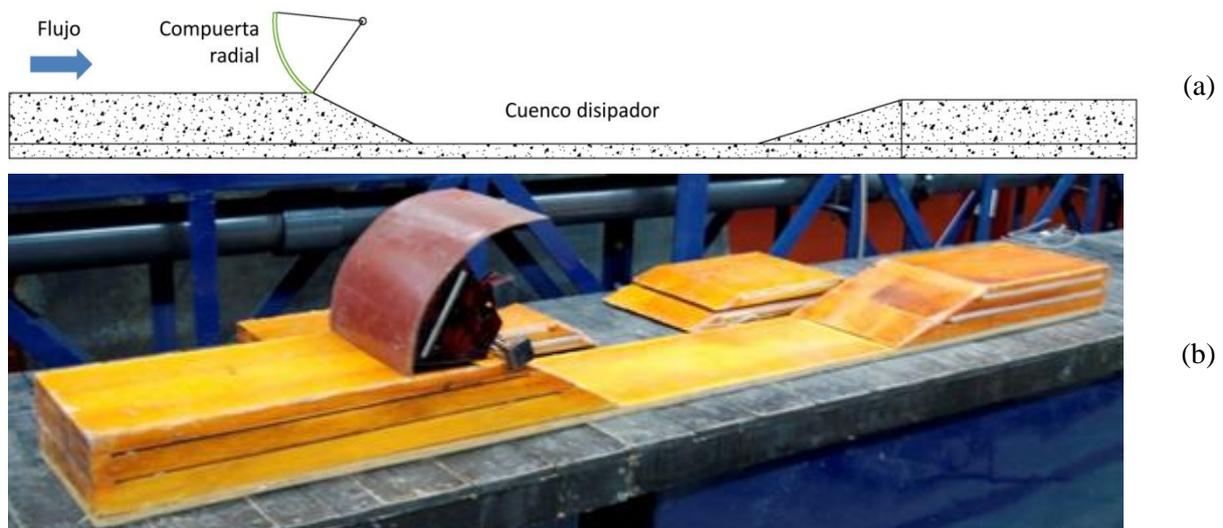


Figura 2. Modelo físico de la compuerta y cuenco dissipador de energía: (a) diseño del modelo físico (PROMAS, 2011), y (b) construcción.

3.2. Identificación de variables de estudio

Las siguientes variables fueron investigadas en la experimentación y se resumen en la Fig. 3.

1. Posición de la compuerta (P): Tres diferentes posiciones de la compuerta con respecto al inicio del cuenco dissipador fueron investigadas con la finalidad de analizar el óptimo control del flujo y barrido de sedimentos.
2. Profundización del cuenco dissipador (z): Tres diferentes profundidades se modelaron con la finalidad de garantizar la correcta dissipación del flujo de vuelta al río.

3. Calado del flujo aguas arriba de la compuerta (H): Constante de diseño igual a 4.12 m en prototipo, 20.6 cm en modelo. H es una variable indispensable para determinar la operación de la compuerta.
4. Caudal (Q): Los ensayos fueron realizados para los tres caudales de diseño previamente descritos.
5. Energía cinética ($V^2/2g$): Se midió la presión en cuatro puntos del talud de ingreso al cuenco disipador colocados a diferentes alturas. Las mediciones se realizaron mediante piezómetros.
6. Velocidad (V_f): Velocidades del flujo se midieron al final del cuenco disipador.
7. Resalto hidráulico (y_1, y_2, LR): Se midieron las alturas inicial y_1 y conjugada y_2 del resalto hidráulico. Además se registraron las abscisas donde se realizaron éstas mediciones para determinar la longitud del resalto hidráulico.
8. Abertura de la compuerta (a): Variable que establece la operación de la compuerta. Esta variable es indispensable calibrar para obtener el calado de diseño aguas arriba. La apertura de la compuerta también define el comportamiento del flujo descargado al cuenco disipador.

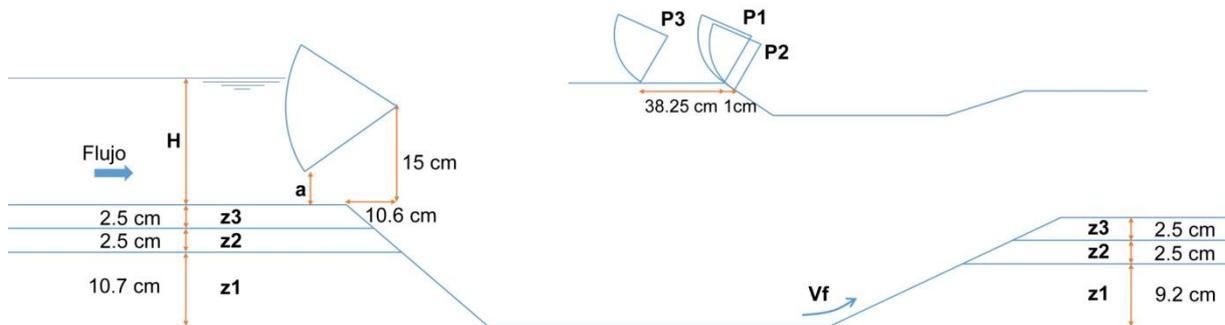


Figura 3. Resumen de variables investigadas, diferentes posiciones de la compuerta y diferentes profundidades del cuenco disipador.



Figura 1. Ilustración de un ensayo: $P = 3$, $z = 2$ y $Q = 20.12$ l/s, equivalente a 600 m³/s. $H = 20.6$ cm. La apertura de la compuerta, a , es 5.8 cm. La presión es medida en el talud de ingreso al cuenco disipador mediante los tubos piezométricos.

3.3. Diseño de los experimentos

Las variables se clasificaron en dependientes e independientes. Las variables independientes son fijas para un tipo de experimento, las cuales son: Q , z , P , H . Las variables dependientes son medidas para una cierta combinación de variables independientes calibradas. Estas son: a , y_1 , y_2 , LR , V_f , $V^2/2g$.

Para cada caudal de diseño experimentado, el sistema se calibró mediante la apertura de la compuerta hasta lograr la carga constante de diseño igual a 20.6 cm. (4.12 m en prototipo). Esta calibración se realizó en cada uno de las configuraciones investigadas, que son tres diferentes posiciones de la compuerta (P_1 , P_2 , P_3) y tres diferentes profundidades del cuenco disipador (z_1 , z_2 , z_3). Por lo que 27 posibles configuraciones del sistema compuerta y disipación de energía fueron investigadas. En todas las posiciones se midieron las variables asociadas al control del flujo bajo la estructura de la compuerta y a través del cuenco disipador. Una ilustración de los ensayos se presenta en la Fig. 4.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

Las variables dependientes fueron analizadas estadísticamente. Las pruebas realizadas fueron normalidad y de homogeneidad. Luego se realizaron análisis de variación de la media de una variable y comparaciones múltiples entre pares de medias. Los análisis se realizaron en tres grupos en función las variables independientes Q , P , z , obteniendo los siguientes resultados:

- La abertura de la compuerta (a) depende sólo y únicamente del caudal, y es independiente de la profundización del cuenco y de la posición de la compuerta.
- La altura contraída del resalto hidráulico (y_1) presenta una gran variabilidad en cuanto a las observaciones con respecto a los tres factores (Q , P , z) ensayados; sin presentar un patrón definido de comportamiento. Esto se debe a la dificultad que presenta en identificar la magnitud exacta de este fenómeno durante la experimentación debido a la gran turbulencia que existe.
- La altura conjugada del resalto hidráulico (y_2) está en función del caudal (Q) y de la profundización del cuenco disipador (z); incrementando su magnitud según aumentan éstos factores. Esta variable afecta en la velocidad de reingreso del flujo al cuenco disipador, la cual obtenida mediante cálculo se mantiene alrededor de 3 m/s; para dichos factores. Analizando ésta velocidad en función de la posición de la compuerta (P) vemos que se mantiene en este valor para las posiciones $P = 1$ y $P = 2$, y aumenta en pequeña magnitud cuando $P = 3$.
- La longitud del resalto varía principalmente en función del caudal y de la profundización del cuenco disipador. Con respecto a la posición de la compuerta las medias de las observaciones no presentan diferencias significativas. En cuanto a las magnitudes de las longitudes de resalto hidráulico y eficiencia del mismo en función de los tres factores estudiados (Q , P , z), se observa que a menor longitud de resalto mayor eficiencia se presenta en cuanto a la disipación de la energía.

Con fines del diseño del prototipo, se tiene que la mayor eficiencia del resalto se da en las posiciones $P = 1$, $P = 2$; y profundizaciones $z = 2$ y $z = 3$. Siendo éstos, casos independientes para las todas las posibles variables. Se presentan dos situaciones óptimas tanto en función de P como de z , ya que la diferencia entre sus eficiencias respectivamente es de 1%.

En muchos de los ensayos realizados, ocurrió un fenómeno no común en el cuenco disipador aguas abajo de la compuerta; se produjo una lámina ondulada negativa no estable, que se transformaba regularmente en una lámina sumergida. Este fenómeno se conoce como formación hoyas de chorro ondulatorio negativo, y se lo puede observar en la Fig. 5. El mismo que produce socavación en lechos de ríos aguas abajo de las estructuras de zampeado.

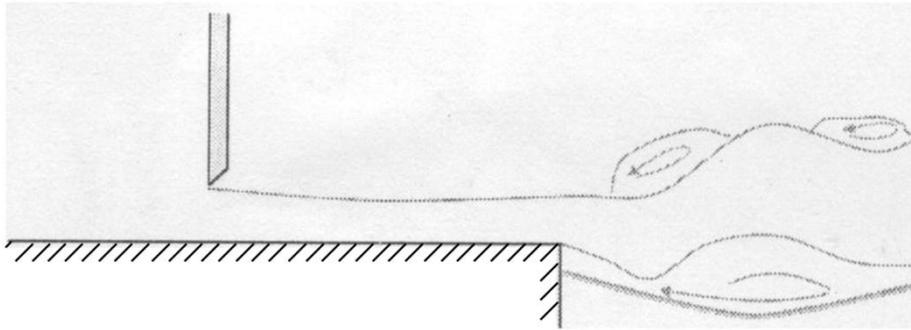


Figura 5. Ilustración de formación de hoyas en el cuenco disipador.

En un promedio el cuenco disipador disipa 50% de la energía, por lo que existe aún un remanente importante de energía; para lo cual se recomienda incluir en el diseño del prototipo una estructura que permita una disipación adicional de energía. Esta estructura es conocida como rizberma, se ubica aguas abajo del cuenco disipador y tiene la función de evitar efectos de socavación (Popovici, 2002).

La profundización del cuenco disipador donde se presentaron los mejores resultados fueron en $z = 2$ y $z = 3$; sin embargo en éstos casos fueron donde se produjeron la mayor cantidad de hoyas. La formación de hoyas se puede controlar dando un tratamiento en el talud de ingreso al cuenco disipador, observando que éste ingreso inclinado con cambios de sección vertical bruscos afectan la formación del resalto, aumentando el número de casos en los que se producen hoyas según se aumenta la profundidad del cuenco. Por lo que se recomienda ajustar la forma geométrica del talud de ingreso a la forma del perfil de descarga del chorro.

Se observó que las posiciones de la compuerta $P = 1$ y $P = 2$, presentan los resultados más favorables del comportamiento de las variables asociadas al control de flujo en modelo físico para los caudales de diseño y las diferentes profundizaciones en la estructura de compuerta de la derivadora Cañar.

Sin embargo, las condiciones operables de la compuerta en la posición $P = 2$ son poco factibles en prototipo, dado que el borde inferior de la compuerta se asienta en el talud de ingreso al cuenco disipador, que es inclinado, esto representaría un problema al momento de abrir la compuerta pudiendo trabarse entre algún objeto y el talud. Por ello se recomienda que el borde inferior esté asentado en una superficie plana, lo cual ocurre en $P = 1$.

Se realizaron ensayos adicionales para un caudal constante de 13.42 L/s (400 m³/s en prototipo) y aberturas constantes de la compuerta $a = 2.5$ y 3 cm (0.5 y 0.6 m en prototipo respectivamente); de donde observamos que la carga de agua en la compuerta puede llegar hasta 30 cm. ($H_{prot} = 6.00$ m).

5. CONCLUSIONES

La modelación física constituye un gran soporte en etapas de diseño de obras hidráulicas dado que se puede probar los cálculos matemáticos y experimentar diferentes alternativas para encontrar una óptima solución. La modelación física requiere rigurosos cálculos del análisis dimensional y teoría de la similitud para que los resultados puedan ser aplicados al prototipo.

En los experimentos del flujo a través del modelo de la compuerta de la derivadora Cañar se determinó que el cuenco disipador tiene una eficiencia del 50% por lo que es necesario incluir una rizberma en el diseño.

Se determinó que las condiciones óptimas de control de flujo y de operación de la compuerta ocurren en la posición $P = 1$. Esta posición corresponde al filo inferior de la compuerta

coincidiendo con el vértice superior del talud de ingreso al cuenco disipador. Y el eje del muñón ubicado a 10,64 cm (2.13 m en prototipo) horizontalmente y 15 cm (3 m en prototipo) verticalmente desde vértice mencionado. La profundización óptima del cuenco disipador es $z = 2$, la misma que es una profundidad de 13.2 cm (2.64 m en prototipo). Es recomendado modificar la geometría del talud de ingreso del cuenco disipador a un perfil ajustado a la descarga del chorro, con la finalidad de mitigar la formación de hoyas flujo ondulatorio negativo en el cuenco disipador, salvaguardando de esta forma efectos de socavación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Dr. Leonardo Morales, jefe del equipo consultor del proyecto, por su apoyo brindado para la realización de los modelos físicos. A la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca por facilitar las instalaciones del laboratorio de hidráulica para el desarrollo de los experimentos, en especial al entonces director del laboratorio Ing. Marcelo Cabrera. A PROMAS por prestar las facilidades y guía para la realización de esta investigación en especial al Ing. Cristian Coello. Al Sr. Bruno Aguirre, instrumentista del laboratorio, por su buena voluntad y cooperación cuando fue requerida.

BIBLIOGRAFÍA

- Buckingham, E., 1914. On physically similar systems. Illustrations of the use of dimensional equations. *Phys. Rev. (American Physical Society)*, 4(4), 345-376.
- Chanson, H., 2002. *Hidráulica del flujo en canales abiertos*. Traducido por J. Saldarriaga. Bogotá: McGraw-Hill Book Company, New York.
- Equipo Consultor, 2011. *Prediseño de obras civiles, ingeniería hidráulica. Estudio para el Control de Inundaciones de los Ríos Bulubulu - Cañar - Naranjal*. Informe de fase 2. Estudios de factibilidad. Reporte Técnico, No Publicado.
- Novak, P., A. Moffat, C. Nalluri. 2001. *Estructuras hidráulicas* (2ª ed.) Traducido por G.R. Santos Granados. Bogotá: McGraw-Hill Book Company, New York.
- Popovici, A. 2002. *Baraje pentru acumulari de apa* (Vol. II). Represas para Almacenamiento de Agua. Bucarest: Editura Tehnica: Ing, Mate, Chim, Elec.
- PROMAS, 2011. *Informe de avance de estudios hidrológicos, climáticos y modelos hidráulicos; en el marco del Proyecto de Control de Inundaciones de los Ríos Bulubulu - Cañar - Naranjal*. Reporte Técnico, Universidad de Cuenca - Programa para el Manejo del Agua y Suelo (PROMAS), No publicado.
- Streeter, V., B. Wylie, K. Bedford. 2000. *Mecánica de fluidos* (9ª ed.). Traducido por J. Saldarriaga. Bogotá: McGraw-Hill Book Company, New York.