

ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOS MODELOS HEC-RAS E IBER EN LA EVALUACIÓN HIDRÁULICA DE PUENTES

COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN HEC-RAS MODELS AND IBER IN THE HYDRAULIC ASSESSMENT OF BRIDGES

J. Rincón¹, M. Pérez², G. Delfín³, C. Freitez⁴, F. Martínez⁵

Recibido 11/11/2016: Aprobado: 03/04/2017

RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo realizar un análisis comparativo entre los modelos Hec-RAS e IBER, en la evaluación hidráulica de ríos con estructuras como son los puentes. El caso de aplicación fue la quebrada La Guardia, ubicada en la vía que comunica las ciudades de Barquisimeto-Quíbor, Venezuela. La primera fase del estudio consistió en la comparación de los modelos desde el punto de vista conceptual y del manejo de ambos. La segunda fase se enfocó en el caso de estudio, y la comparación de los resultados obtenidos del análisis hidráulico. Se pudo observar que el comportamiento en ambos modelos presentó gran similitud en cuanto al perfil del flujo como en el régimen. Aguas arriba de los dos puentes predomina el régimen subcrítico, donde se presentan las profundidades más altas y las velocidades más bajas. Lo contrario ocurre aguas abajo de los dos puentes, donde predomina el régimen supercrítico, las velocidades altas y las profundidades mínimas. Se concluye que, para ríos con geometría simple y preferiblemente con un solo puente, el software unidimensional Hec-RAS se presenta como la mejor alternativa de uso debido a la facilidad en la introducción de datos, proporcionando resultados confiables en un menor tiempo. Mientras que el paquete IBER por ser bidimensional, representa una mejor opción para modelaciones de ríos con geometrías de mayor irregularidad, cuando se tiene especial interés en el comportamiento hidráulico del flujo a través de estribos y pilas, y al tener dos o más puentes con separación reducida.

Palabras clave: Simulación hidráulica, ríos, puente, HEC-RAS, IBER

¹Jean Carlos Rincón Docente Investigado en la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. Venezuela. Ingeniero Civil. Correo: jcrincon@ucla.edu.ve

²María Pérez. Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. Venezuela. Ingeniero Civil. Correo: vicky.l_2202@hotmail.com

³Guillermo Delfín Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. Venezuela. Ingeniero Civil. Correo: guillermeando@gmail.com

⁴Carlos Freitez. Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. Venezuela. Ingeniero Civil. Correo: carlosfreitezp@gmail.com

⁵Fabiana Martínez Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. Venezuela. Ingeniero Civil. Correo: fanabi_1216@hotmail.com

ABSTRACT

This work aims to perform a comparative analysis between the Hec-RAS and IBER models, in the hydraulic evaluation of rivers with structures such as bridges. The case of application was the La Guardia creek, located in the road that communicates the cities of Barquisimeto-Quíbor, Venezuela. The first phase of the study consisted in the comparison of the models from the conceptual point of view and the management of both. The second phase focused on the case study, and the comparison of the results obtained from the hydraulic analysis. It was observed that the behavior in both models presented great similarity in the flow profile as in the regime. Upstream of the two bridges predominate the subcritical regime, where the highest depths and the lowest velocities are present. The opposite occurs downstream of the two bridges, where the supercritical regime prevails, high speeds and minimum depths. It is concluded that, for rivers with simple geometry and preferably with a single bridge, the Hec-RAS one-dimensional software is presented as the best alternative of use due to the ease of data entry, providing reliable results in a shorter time. While the IBER package is two-dimensional, it represents a better option for modeling rivers with more irregular geometries, when there is a special interest in the hydraulic behavior of the flow through stirrups and stacks, and having two or more bridges with separation reduced.

Keywords: *Hydraulic simulation, rivers, bridge, HEC-RAS, IBER*

1. INTRODUCCIÓN

Un río es un canal natural que transporta principalmente el agua proveniente de la lluvia que cae sobre la cuenca que lo contiene hasta su desembocadura. Cuando se excede la capacidad del canal para conducir el agua, se produce el desbordamiento de los mismos que dependiendo de su magnitud puede ocasionar daños como pérdidas materiales y humanas. Sin embargo, la mayoría de las veces, estos perjuicios ocurren porque no se respeta sus llanuras de inundación, o porque se construyen sobre él puentes mal proyectados que desde el punto de vista hidráulico, no permiten que las aguas fluyan libremente. La rama de la hidráulica por medio del cual se estudia estos problemas es la hidráulica fluvial. Específicamente, estudia el comportamiento propio del río y la interacción con su entorno, particularmente cuando las acciones humanas ocasionan una reacción o cambio por efecto de la construcción de alguna obra civil, como por ejemplo los puentes, que son estructuras diseñadas para atravesar obstáculos presentes en un camino, entre los que destaca el cruce de ríos.

Los puentes con el paso del tiempo se han convertido en una necesidad para las personas. La conexión entre caminos que son separados por el cauce de un río ya no es un problema, es más, con el transcurrir de los años se ha perfeccionado en el diseño de mejores estructuras y se ha innovado en las características, empleo de materiales y construcción de éstos. El desarrollo de la ciencia, y mucho más de la ingeniería ha permitido tener mejores resultados, en cuanto a durabilidad, seguridad y funcionalidad de los puentes, lo que ha permitido un avance considerable en este campo. Sin embargo, el estudio en ríos es realmente de carácter

empírico, puesto que no se puede tener certeza plena de cómo será la respuesta ante la intervención del hombre. Además, existen diversos métodos de análisis y su precisión es muy variable. Por esto, la apreciación del ingeniero se ha convertido en la principal y fundamental herramienta para determinar el comportamiento de los ríos, con base a la experiencia e intuición del especialista, sus conocimientos técnicos y científicos, y sucesiva recolección de datos e información.

La interacción entre el río y los puentes puede tener efectos perjudiciales, ya que, si estos últimos no se diseñan bajo las características propias y específicas de dicho río, puede ocasionar daños en la estructura. La construcción de una obra hidráulica altera el comportamiento fluvial, lo que se manifiesta mediante procesos de erosión y/o sedimentación. A su vez los sólidos transportados por las corrientes líquidas causan daños a las estructuras que están en contacto con ellas [1]. En el diseño y/o evaluación de puentes intervienen diferentes variables desde el punto de vista estructural, hidráulico, morfológico, vial, sin embargo, en las fallas de éstas obras encontradas a nivel mundial, se ha notado que en sus diseños existe un énfasis notorio en el aspecto estructural sin tomar en consideración de manera apropiada el efecto hidráulico del mismo [2].

Un ejemplo se encuentra en Venezuela específicamente en el Estado Lara, donde en el año 2008 uno de los puentes sobre la quebrada La Guardia, estructura ubicada en la troncal 7 de la autopista Lara–Zulia, en el municipio Jiménez, que permite la comunicación entre el Municipio Iribarren y los Municipios Moran, Jiménez y Andrés Eloy Blanco, se vio afectado por el fenómeno de la socavación ocasionando el colapso del mismo [3]. El puente fue reinaugurado en el año 2014, y en búsqueda de garantizar la protección de la importante arteria vial implicada, surge la necesidad de realizar una evaluación hidráulica de la quebrada “La Guardia” y de los puentes ubicados sobre esta, el ya existente y el recién construido, con la finalidad de determinar los diferentes parámetros de comportamiento de dicho afluente: perfil de agua, velocidad de flujo, profundidad en diferentes estaciones, estableciendo la influencia de las estructuras sobre este.

Para el análisis de estos problemas y otros más de carácter hidráulico, se han desarrollado modelos matemáticos numéricos hidráulicos unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales que permiten predecir de manera más sistemática el comportamiento real de un río y su interacción con un puente ante la presencia de avenidas [4]. Los modelos son de gran ayuda para la evaluación hidráulica de los puentes, ya que simplifican los cálculos de diseño y permiten obtener una correlación entre la situación actual y posterior a la

construcción de dicha obra civil [3]. El modelo unidimensional seleccionado para este estudio es el programa Hec-RAS (<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>), de carácter gratuito y desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos para la realización de cálculos hidráulicos en una dimensión de sistemas de cauces naturales o artificiales [5]. Por otro lado, el modelo bidimensional seleccionado es el software IBER (<http://www.iberaula.es/web/index.php>), también gratuito desarrollado en colaboración por el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA (Universidad de A Coruña, UDC) y el Instituto FLUMEN (Universitat Politecnica de Catalunya, UPC, y Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE) para la simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen no-permanente, y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial [6]. Se pretende con este caso de estudio, además de evaluar desde el punto de vista hidráulico su situación, realizar un análisis comparativo de ambos programas, a fin de determinar su pertinencia en el estudio de este tipo de problemas.

2. METODOLOGÍA

La parte metodológica de la investigación se divide en dos fases, la primera donde se realiza la comparación de los modelos Hec-RAS e IBER desde el punto de vista de su formulación matemática como de su manejo. La segunda referida a la aplicación de los programas a un caso de estudio para su posterior análisis.

2.1. Formulación matemática de Hec-RAS e IBER para la modelación hidráulica de ríos con lecho fijo y la consideración del puente

La formulación matemática del modelo Hec-RAS en su condición de flujo no permanente y lecho fijo, viene dada por el principio de conservación de la masa (continuidad) y el principio de conservación del momentum, ambas en una dirección. Estos son expresados matemáticamente en forma de ecuaciones diferenciales parciales como se indican en (1) y (2) [5]. Estas ecuaciones son resueltas por el software a través de un esquema de diferencias finitas implícita.

$$\frac{\partial A_t}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (2)$$

Donde A_t es el área total de flujo, Q es el caudal total, q_l es el caudal de entrada lateral por unidad de ancho, V es velocidad promedio del flujo, g es la aceleración de la gravedad, $\partial z / \partial x$ es la pendiente de la superficie del agua y S_f es la pendiente de fricción.

En tanto en el modelo IBER, la respuesta hidrodinámica viene dada por la resolución a través del método de los volúmenes finitos, de las ecuaciones de aguas someras bidimensionales promediadas en profundidad (ecuaciones de St. Venant bidimensionales). Es decir, se resuelven las ecuaciones de conservación de la masa y de Momento en las dos direcciones horizontales (3), (4) y (5) [6].

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = M_s \quad (3)$$

$$\frac{\partial h U_x}{\partial t} + \frac{\partial h U_x^2}{\partial x} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} - \frac{g h^2}{\rho} \frac{\partial \rho}{2 \partial x} + 2\Omega \sin \lambda U_y + \frac{\partial h \tau_{xx}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial y} + M_x \quad (4)$$

$$\frac{\partial h U_y}{\partial t} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial x} + \frac{\partial h U_y^2}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} - \frac{g h^2}{\rho} \frac{\partial \rho}{2 \partial y} + 2\Omega \sin \lambda U_x + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}^e}{\partial y} + M_y \quad (5)$$

Donde h es el calado, U_x , U_y son las velocidades horizontales promediadas en profundidad, g es la aceleración de la gravedad, Z_s es la elevación de la lámina libre, τ_s es la fricción en la superficie libre debida al rozamiento producido por el viento, τ_b es la fricción debido al rozamiento del fondo, ρ es la densidad del agua. Ω es la velocidad angular de rotación de la tierra, λ es la latitud del punto considerado, τ_{exx} , τ_{exy} , τ_{eyy} son las tensiones tangenciales efectivas horizontales, y M_s , M_x , M_y son respectivamente los términos fuente/sumidero de masa y de Momento, mediante los cuales se realiza la modelización de precipitación, infiltración y sumideros.

En relación a la hidráulica del puente, Hec-RAS toma en cuenta primeramente si el flujo es bajo o alto, entendiéndose por flujo bajo aquel donde la superficie del agua no toca la cota inferior del tablero del puente, y flujo alto cuando la superficie del agua supera dicha cota. Si el flujo es bajo, hidráulicamente el puente actúa como una contracción en el cauce, pudiendo establecerse en él un punto de control, así, el modelo permite calcular hidráulicamente el puente según cuatro métodos: a) ecuación de la energía, b) balance de la cantidad de movimiento, c) método de Yarnel, y d) método FHWA WSPRO (solo aplicable para flujos subcríticos en el puente).

Por el contrario, si el flujo es alto, el modelo determina si la cota de la superficie del agua es mayor que la cota inferior del tablero, pero menor que la cota superior (no hay desborde por la calzada). Si es así, el cálculo hidráulico se hace asumiendo flujo a través de un orificio, o a través de una compuerta dependiendo si el ancho del puente se mantiene sumergido, caso contrario, si existe desborde por la calzada entonces el cálculo hidráulico se realiza

incorporando al caso anterior, el flujo a través de un vertedero [5].

La modelación del puente en IBER se puede realizar de dos maneras: la primera incorporándolo como una estructura en la malla, y la segunda modificando la malla a partir de la incorporación de un archivo geométrico de las pilas del puente. En ambos casos se puede incorporar las pérdidas locales producidas por la estructura. El comportamiento hidráulico en el puente viene dado por los resultados de las mismas ecuaciones hidrodinámicas 2D indicadas anteriormente.

2.2. Entrada de datos en Hec-RAS e IBER

La entrada de datos en Hec-RAS se realiza mediante una interfaz gráfica que contempla la creación de tres archivos donde se incluyen los datos generales, los geométricos y los de flujo [7]. En el archivo de datos generales se crea el nombre del proyecto, se configura el sistema de unidades (métrico o inglesa) y se habilitan las ventanas para la creación de los archivos faltantes. En el archivo de datos geométricos, se almacena el esquema del río con la información de sus secciones transversales y la del puente sin ningún tipo de limitaciones en cuanto al número de ellas. Los datos más importantes introducidos en las secciones transversales son las coordenadas x-y de las mismas, la distancia entre ellas, la ubicación del cauce principal y de las planicies de inundación, los coeficientes de expansión y contracción, el coeficiente de rugosidad de Manning y, en caso de existir, las áreas de flujo inefectivas.

Los datos más relevantes en cuanto al puente son: distancia entre las secciones inmediatas aguas arriba y aguas abajo del puente, longitud de calzada, ancho de tablero, ubicación de pilas y estribos, así como los datos requeridos según método de cálculo a emplear. En el archivo de datos del flujo se introducen las condiciones de borde a la entrada: hidrograma de caudal, hidrograma de nivel, hidrograma de caudal y nivel. A la salida: hidrograma de caudal, hidrograma de nivel, hidrograma de caudal y nivel, curva de gasto, profundidad normal. Además de, las condiciones iniciales para la simulación en flujo no permanente, como lo es el caudal en la sección extremo aguas arriba [3].

En tanto, la entrada de datos en IBER se realiza a través de la interfaz gráfica. Para ello, es necesario definir la geometría del río a simular, se puede crear directamente en el programa o importar a partir de un modelo digital del terreno, el cual deberá contener la estructura hidráulica, principalmente los estribos y aletas. Las pilas son incorporadas en la malla de cálculo. Una vez incorporada la geometría en el programa, se definen las condiciones hidrodinámicas del modelo que son:

- Las condiciones iniciales: referido a las condiciones del río al comienzo de la simulación. Estas pueden definirse a través de un calado o una cota de agua y debe asignarse a todo el dominio.
- La condición de contorno a la entrada: Esta condición se refiere a la situación del fluido en la entrada al dominio y puede estar expresada en términos del caudal total, del caudal específico (caudal por unidad de ancho), o de una cota de agua. En cualquiera de los casos será necesario introducir los parámetros requeridos, los cuales dependerán de si el régimen del fluido a la entrada es subcrítico, crítico, o supercrítico.
- La condición de contorno a la salida: Esta condición tiene que ver con la situación del fluido a la salida del dominio que a su vez depende del régimen. Si este es subcrítico se deben especificar parámetros adicionales, en función de la condición establecida, que puede ser de tipo vertedero, de nivel conocido (cota o calado) o a través de una curva de gasto. Si, por el contrario, el régimen es supercrítico o crítico no es necesario asignar parámetros adicionales.
- Rugosidad: al igual que Hec-RAS, la rugosidad se representa a través del coeficiente de rugosidad de Manning el cual se hace mediante la escogencia de un uso del suelo y la asignación a las superficies que forman la geometría.

El siguiente paso es la configuración de la malla de cálculo. La resolución de una ecuación diferencial por el método de volúmenes finitos, es necesario realizar previamente una discretización espacial del dominio a estudiar. Para ello se divide el dominio de estudio en celdas de tamaño relativamente pequeño (malla de cálculo). IBER trabaja tanto con elementos triangulares como con cuadriláteros, o con mallas mixtas de triángulos y cuadriláteros. Las mallas de cálculo pueden ser a su vez regulares o irregulares, así como estructuradas o no estructuradas.

En esta etapa es cuando se incorporan las pilas del puente, en caso de existir, la cual se realiza dividiendo la malla de cálculo en la zona donde están localizadas las pilas, en elementos más pequeños y luego asignando una nueva elevación a través de un archivo ASCII que contiene la geometría de las pilas. Finalmente se definen los datos generales del problema como el tiempo inicial y final de la corrida, el intervalo de resultados, el incremento de tiempo máximo, el número de Courant-Friedrichs-Levy, entre otros.

2.3. Simulación hidrodinámica en Hec-RAS e IBER

La simulación del río en Hec-RAS bajo la hipótesis de flujo no permanente, se configura a

través de un archivo en el que se indican los nombres de los sub-archivos que contienen la geometría y los datos del flujo del modelo. Adicionalmente, se selecciona el intervalo de cálculo, el tiempo inicial y final de corrida, el intervalo de resultados y bajo qué régimen del flujo se realizará la simulación. La ejecución del modelo en IBER se realiza a través del menú “calcular”.

2.4. Visualización de resultados en Hec-RAS e IBER

En cuanto a la visualización de los resultados de la simulación, Hec-RAS permite realizar diferentes reportes de tipo gráfico o tabular, sirviendo de soporte para la elaboración de un análisis hidráulico exhaustivo, entre estos están: gráfico de niveles de agua por secciones transversales, gráfico de perfiles superficiales del agua, evolución de diversos parámetros hidráulicos en el tramo en estudio como velocidad, número de Froude, esfuerzo cortante, entre otros, así como tablas con resultados hidráulicos por secciones transversales. En cuanto al puente, el modelo muestra a través de gráficos los niveles en las caras aguas arriba y aguas abajo, y por medio de tablas se pueden verificar resultados como caudal circulante por el puente discretizado por flujo bajo y flujo alto, la pérdida de energía en el puente, velocidad, número de Froude, profundidad máxima, entre otros para la cara aguas arriba y aguas abajo del puente.

Por su lado, IBER dispone de una variedad de opciones para visualizar y analizar los resultados. Una opción es a través del menú “Ventana > ver resultados”. La ventana que se abre permite acceder a los distintos mapas de resultados (o Análisis) que se pueden visualizar en cada instante de tiempo, como áreas coloreadas, áreas coloreadas suavizadas, o vectores. También es posible crear gráficos de utilidad para el análisis de resultados, como evolución de un parámetro hidráulico en un punto de la malla en el tiempo, resultado de un parámetro hidráulico en una línea para un tiempo dado, entre otros. En cuanto al puente, el modelo no presenta resultados particulares del mismo.

2.4. Caso de estudio: Puentes sobre la quebrada La Guardia

Los puentes que sirvieron de base para el análisis hidráulico en este estudio se encuentran ubicados en el Municipio Jiménez del Estado Lara, sobre la quebrada la Guardia, la cual es intermitente y recibe su afluente de otras quebradas de la región. Actualmente forma parte de una de las tres fuentes que proporciona agua para el riego agrícola en el valle de Quíbor en las épocas de sequía. Específicamente, las estructuras están posicionadas en las coordenadas: N: 1.100.189,01 E: 436.609,34 aproximadamente.

Sobre dicha quebrada se construyó un puente que inicialmente poseía dos canales, y se construyó con concreto ciclópeo hace más de 50 años. Al transcurrir el tiempo por la alta demanda de la vía se decidió edificar otro puente de dos canales, más moderno ejecutado con concreto armado con las siguientes características: ancho de la calzada = 10,50 m, largo del tablero = 91,90 m, estribos con aletas en ambos extremos del puente y 2 pilas en un mismo eje de $\varnothing=1,30$ m ubicada en la parte central del puente. Finalizada esta construcción se obtuvo para cada puente, dos canales en el mismo sentido, uno de Barquisimeto hacia Quíbor y el otro a su vez con sentido Quíbor-Barquisimeto.

En el 2008, uno de los canales del puente de concreto ciclópeo se desplomó, y no fue hasta el año 2014 que el mismo fue reinaugurado, quedando de las siguientes características: ancho de la calzada = 9,60 m, largo del tablero = 105,00 m, estribos con aletas en ambos extremos del puente y 16 pilas de $\varnothing=1,00$ m en 4 ejes, distribuidas a lo largo del puente. Inmediatamente aguas abajo, se encuentra una obra de protección compuesta por unos escalones de concreto los cuales cumplen la función de disipar la energía cuando el río entra en operación. El levantamiento topográfico fue realizado por la empresa Asociación Cooperativa Acimut 90 RL en una extensión de 600,00 m de longitud del cauce, incluyendo los detalles de los puentes.

El estudio hidrológico tuvo como objeto estimar el caudal pico y el hidrograma de salida de la quebrada La Guardia hasta el sitio donde se encuentra el puente, considerando tormentas con periodos de retorno adecuados a la importancia de la estructura. Para el diseño o análisis de puentes, se pueden justificar periodos de retorno entre 25 y 100 años en función la importancia de la estructura y el grado de seguridad deseado [8]. Del estudio realizado se obtuvo que la cuenca cuenta con un área de 94,15 Km² y en el análisis hidrológico realizado mediante modelación en el software Hec-HMS, se determinó el hidrograma de caudales en el sitio de estudio y un caudal pico de 231,20 m³/s en un tiempo al pico de 4 horas, para un periodo de retorno de 50 años a partir del registro de 18 años (1976-1993) de datos de lluvias máximas para la estación pluviométrica Cubiro [9].

Coeficiente de rugosidad de Manning

Para la estimación del coeficiente de Rugosidad Manning se tomaron 3 muestras del lecho del río, y se determinó la curva granulométrica siguiendo la metodología propuesta por [10]. Posteriormente, se procedió al cálculo del coeficiente de rugosidad del cauce empleando el método de Cowan [11], el cual considera otros factores además del material como: el grado de

irregularidad, la variación de la sección transversal, el efecto relativo de las obstrucciones, la vegetación y el grado de los efectos por meandros, obteniendo un coeficiente de Manning para el cauce principal de la quebrada de 0,034.

Configuración de los modelos matemáticos

- HEC-RAS: Se creó el archivo de datos generales, asignando un nombre al proyecto. Se realizó la conformación del archivo de datos geométricos haciendo uso de la extensión HecGeoRas de ArcGIS. Para ello, a partir del levantamiento topográfico se procesó un modelo digital del terreno en formato TIN y con la extensión HecGeoRAS. Se definió el eje del río, los bancos, las secciones transversales representativas del cauce y se asignó el coeficiente de rugosidad de Manning igual a 0,034 en todo el río, a excepción de la estructura de disipación aguas abajo del segundo puente al cual se le asignó un coeficiente de rugosidad de 0,016 correspondiente a material de concreto.

Dichas secciones fueron ubicadas a distancias variables, en un rango entre 15,00 y 50,00 m, a excepción de los escalones existentes aguas abajo del segundo puente, donde se colocó una sección antes y otra después del escalón a fin de reflejar geométricamente la existencia del mismo. Todo esto fue exportado a Hec-RAS. Posteriormente se configuraron los dos puentes dentro del archivo geométrico a partir de la data levantada en campo. En definitiva, el modelo quedó conformado por 33 secciones.

Luego se configuró el archivo de datos del flujo considerando flujo no permanente, y el hidrograma de caudales para el período de retorno seleccionado atendiendo los 3 criterios fundamentales propuestos por [12], dentro de los cuales se encuentran: función que desempeña la obra de drenaje, importancia vida útil de la vía. Por esta razón, y por tratarse de un puente ubicado sobre una importante arteria vial, que juega un papel importante en la comunicación de dos municipios, el periodo de retorno seleccionado fue de 50 años.

Como condiciones de borde aguas arriba se introdujo el hidrograma de caudales indicado, mientras que para la condición de borde aguas abajo se seleccionó dentro de las opciones disponibles, profundidad normal. Ante la incertidumbre en cuanto a esta última condición de borde, se realizó la modelación para dos pendientes diferentes, una supercrítica ($S_f=0,031$) y una subcrítica ($S_f=0,0085$), a fin de evaluar a que distancia del extremo aguas abajo los resultados son independientes de la condición de borde aguas abajo.

- IBER: A partir del modelo digital del terreno en formato TIN, y con el empleo del Sistema de Información Geográfica ArcGIS, se realizó la conversión a formato raster, luego a

formato ASCII, de tal manera, que pudiera ser importado por IBER a través de la herramienta RTIN del software. Los parámetros empleados para importar la geometría fue un error cordal de 0,10 m y un lado mínimo y máximo de 1,00 y 10,00 m respectivamente. Se colapsó la geometría con la finalidad de eliminar la duplicidad de líneas en los lados anexos entre superficies vecinas, para obtener la geometría del cauce a estudiar.

Luego fueron introducidos los datos hidrodinámicos en los que destacan: la condición inicial el cual se asigna profundidad de agua cero a todo el dominio, la condición de borde aguas arriba que corresponde al hidrograma de caudales para el período de retorno de 50 años tomado de [9]. Para la condición de borde aguas abajo se realizó un análisis similar al mencionado para Hec-RAS, es por ello que se realizaron dos corridas, una con condición de borde supercrítica y otra con condición de borde subcrítica, a fin de establecer a partir de que distancia los resultados serán confiables no afectando el resto del dominio. Luego se asignó el coeficiente de rugosidad de Manning igual a 0,034 o 0,016, según sea el caso.

Seguidamente, se generó la malla de cálculo. Para este caso, se creó con el criterio de formar un elemento en cada superficie la cual tiene como principal ventaja trabajar como mallas no estructuradas las cuales se adaptan a cualquier geometría, ya que no es necesario que la malla tenga ningún tipo de organización o estructura interna. Esta característica las hace especialmente indicadas y adecuadas para su utilización en hidráulica fluvial, por tal motivo este tipo de malla se utilizó para el caso en estudio.

Finalmente, se introdujeron los datos generales para la corrida, como inicio y fin quedando establecido en 0 s y 21600 s respectivamente, un intervalo de resultados de 600 s y el intervalo de tiempo máximo igual a 60 s.

Corrida de los modelos matemáticos

La corrida en Hec RAS se realizó activando la ventana de “Unsteady Flow Analysis” donde se indicaron los nombres de los archivos que contienen los datos geométricos y del flujo, los tiempos de simulación (6 horas) y parámetros de corrida (intervalo de cálculo: 5 min e intervalo de resultados 10 min), luego se presionó el botón “Compute”. Si la corrida resulta satisfactoria quedan los resultados disponibles para su verificación. En tanto en IBER, en el menú “Calcular/Calcular” se da inicio a la corrida. En caso de problemas de inestabilidad numérica, la misma se detiene indicando las razones, de lo contrario culmina su proceso.

3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1. Análisis de la condición de borde aguas abajo

Como se indicó en la metodología, se realizaron dos corridas en Hec-RAS y dos corridas en IBER, con variación de la condición de borde aguas abajo, procurando establecer una subcrítica y una supercrítica. Los resultados obtenidos para el instante que se presenta el caudal pico ($231,20 \text{ m}^3/\text{s}$) se muestran en las figuras 1 y 2. En ambos casos se puede concluir que a partir de 60,00 m medidos desde el extremo aguas abajo, los resultados son independientes de la condición de borde impuesta. Por consiguiente, las comparaciones se realizaron considerando la distancia indicada.

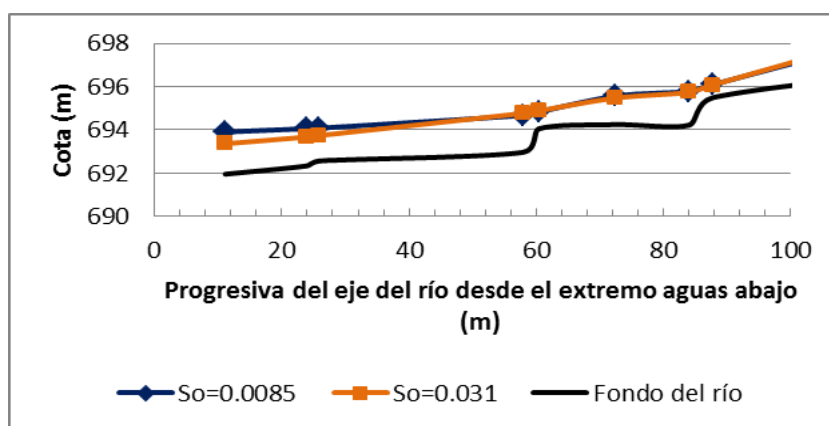


Figura 1. Análisis condición de borde aguas abajo en Hec-RAS, instante caudal pico. Fuente: los autores

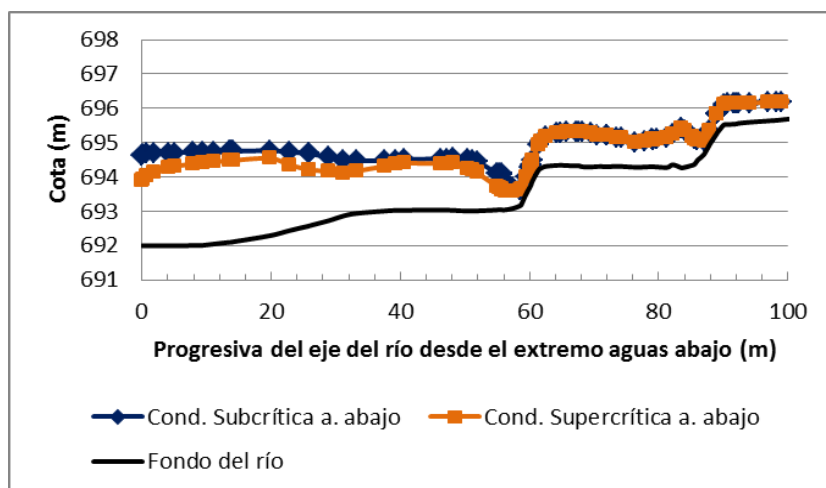


Figura 2. Análisis condición de borde aguas abajo en IBER, instante caudal pico. Fuente: los autores

3.2. Mancha de inundación

En las figuras 3a y 3b se muestran las manchas de inundación para el instante del caudal pico generada por Hec-RAS e IBER respectivamente. En el caso de Hec-RAS, se hizo uso de la herramienta RAS Mapper incorporada en el paquete para la generación de manchas de

inundación, y en IBER se aplicó la herramienta áreas coloreadas en el postproceso del modelo. En ambas situaciones se evidencia resultados muy similares en cuanto a la mancha de inundación.

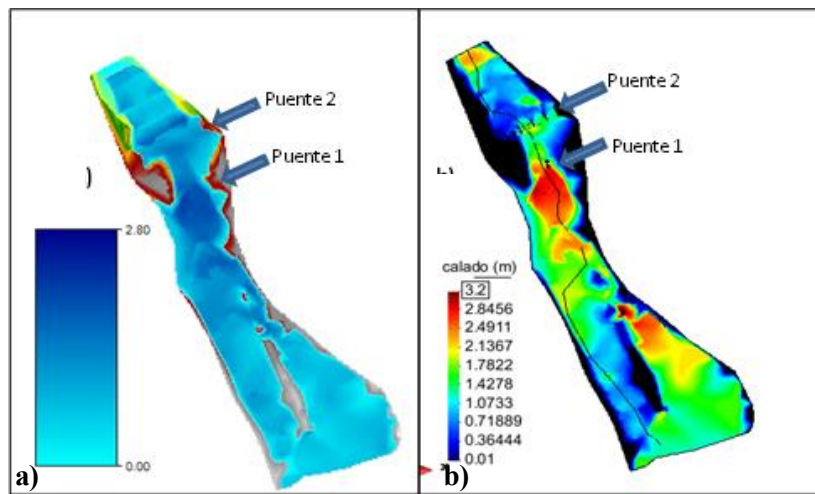


Figura 3. a) Mancha de inundación Hec-RAS (caudal pico). b) Mancha de inundación IBER (caudal pico)

Respecto a los calados máximos, ocurren inmediatamente aguas arriba del “puente 1” existente, para el caso de Hec-RAS el máximo es de 2,80 m mientras que en IBER se tiene un máximo de 3,20 m justo en la cara aguas arriba de la pila. Posteriormente, las manchas fueron exportadas a Autocad para realizar la superposición de las mismas (ver figura 4). En ella, se observa como los resultados en este aspecto son similares a pesar de trabajar con modelos numéricos 1D y 2D. De manera más específica la mancha de inundación en Hec-RAS (1D) tiene un área de 44621,98 m² mientras que IBER (2D) tiene un área de inundación de 47040,53 m², lo que representa una diferencia de un 5%.

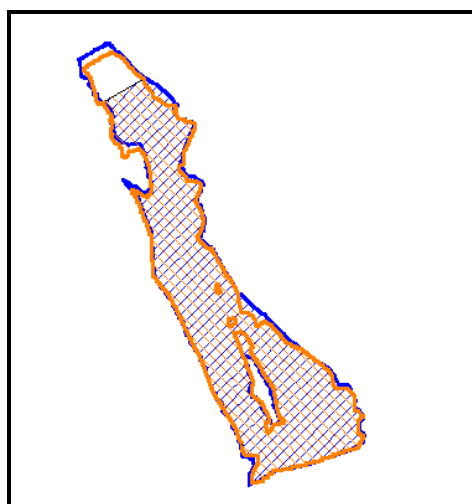


Figura 4. Manchas de inundación superpuestas

3.3. Perfil topográfico del lecho del río y perfil del agua

Se observa en la figura 5 el perfil del lecho del río resultado de los modelos Hec-RAS e IBER y los correspondientes perfiles de agua para el instante de tiempo donde ocurre el caudal pico. En cuanto al fondo del río se pueden observar pequeñas discrepancias entre ambos modelos, lo cual se debe a que en el modelo Hec-RAS el lecho del río queda discretizado a través de secciones transversales mientras que en el modelo IBER, la geometría del río se discretiza a través del modelo digital de elevación y la posterior malla de cálculo, que por supuesto representa de una mejor manera las características geométricas del cauce.

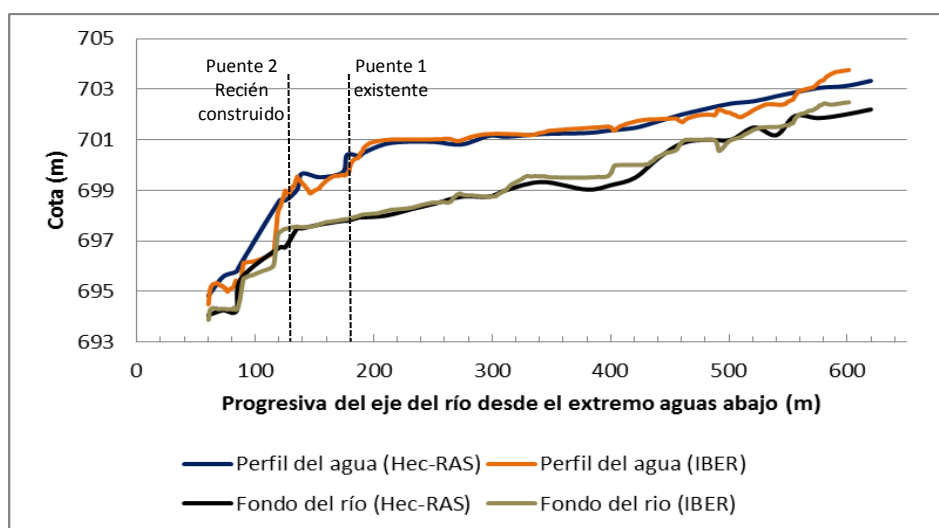


Figura 5. Perfil topográfico y perfil del agua resultante en los modelos Hec-RAS e IBER para el instante de ocurrencia del caudal pico

Respecto al perfil del agua, un tramo aguas arriba del “puente 1” existente de aproximadamente 270,00 m; ambos modelos reflejan el mismo perfil de flujo, y de la progresiva 457,00 m en adelante hay una separación de los perfiles obtenidos, debido a la existencia de una isla central que bifurca el flujo en esa zona. En este sentido, un modelo unidimensional como el Hec-RAS calcula una misma cota de agua en la bifurcación, mientras que el modelo bidimensional IBER puede representar con mayor exactitud el perfil hidráulico por cada tramo de la bifurcación. Aguas abajo, también se pueden apreciar leves diferencias en los perfiles, en este caso se debe a la existencia de los escalones disipadores de energía existentes, lo que en un modelo bidimensional pueden ser mejor representados y modelados.

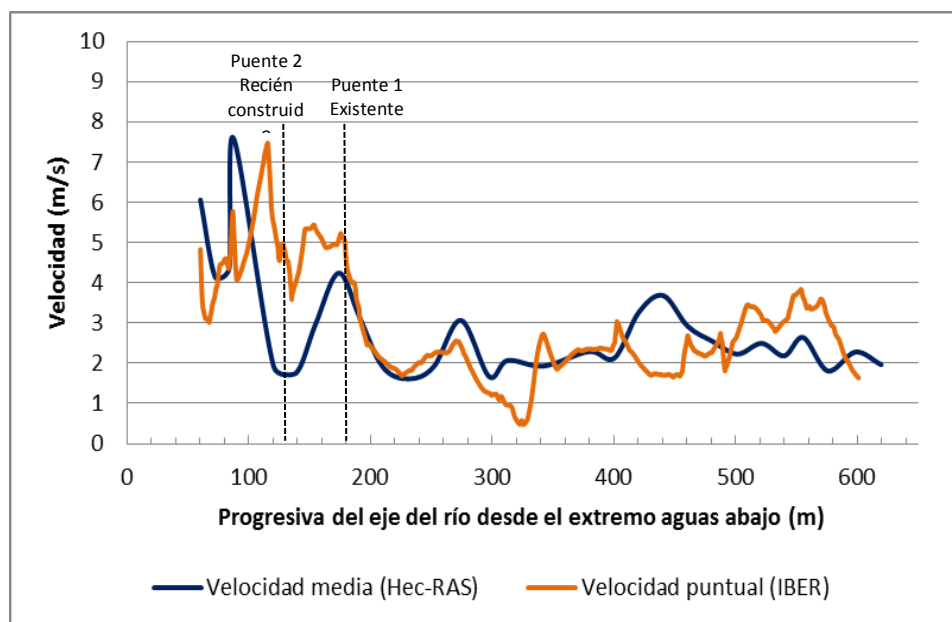
En la tabla 1 se muestran los resultados específicos de los puentes analizados. Para el “puente 1” existente se obtuvieron resultados muy similares en ambos modelos. Ahora bien, en el “puente 2” recién construido se presentan discrepancias principalmente por las diferencias existentes en el perfil topográfico en esta zona.

Tabla 1. Cota de agua y profundidad del flujo cercano a l puente en el instante de ocurrencia del *Q* pico

Ubicación	Cota de agua (m)		Profundidad del flujo (m)	
	Hec-RAS	IBER	Hec-RAS	IBER
Prog. 120,51 (A.abajo puente 2)	698,60	698,31	1,86	0,97
Prog. 139,13 (A.arriba puente 2)	699,65	699,31	2,17	1,76
Prog. 174,02 (A.abajo puente 1)	699,72	699,60	1,93	1,76
Prog. 191,53 (A.arriba puente 1)	700,49	700,68	2,56	2,63

3.4. Velocidad del flujo

La figura 6 muestra los resultados obtenidos para la velocidad del flujo en el tramo del cauce estudiado. Al respecto es importante aclarar que Hec-RAS al ser un modelo unidimensional, los resultados que allí se muestran corresponden a la velocidad media del flujo en cada una de las secciones transversales distanciadas según el eje del río. Mientras que IBER, como modelo bidimensional muestra la velocidad puntual en el eje del cauce principal.

**Figura 6.** Velocidad del flujo resultante por los modelos Hec-RAS e IBER en el instante de *Q* pico.

Como puede observarse, en las zonas cercanas a los puentes hay notables diferencias, más aún en el puente recién construido. Para el “puente 1” existente, Hec-RAS reporta velocidades de 3,12 y 4,24 m/s en las secciones inmediatamente aguas arriba y aguas abajo de las caras superior e inferior del puente respectivamente. IBER por su lado, evidencia velocidades de 3,11 y 5,07 m/s. En tanto, para el “puente 2” recién construido, Hec-RAS presenta una velocidad de 1,75 m/s en la sección inmediatamente aguas arriba del puente y de 1,92 m/s en

la sección aguas abajo del puente, por su parte IBER tiene como resultado valores de velocidad de 4,05 y 5,07 m/s en las secciones indicadas. Esta discrepancia para el “puente 2” podría ser a las diferentes metodologías que aplican los softwares para la modelación del puente, haciéndose más notorio cuando el caso de estudio contempla dos puentes que están cercanos.

Sin embargo, a pesar de las diferencias teóricas de los modelos respecto a la velocidad, puede comprobarse que la máxima velocidad ocurre aguas abajo del puente recién construido en un orden de magnitud de 7,5 m/s aproximadamente, lo que da relevancia a la estructura de disipación de energía que existe en la zona. Aguas arriba de los puentes, Hec-RAS reporta velocidades entre 1,7 y 3,8 m/s, por su lado IBER presenta velocidades entre 0,5 y 4 m/s, por lo que la máxima velocidad en el tramo también es similar.

3.5. Número de Froude y Régimen del Flujo

Para analizar esta variable hidráulica se extrajo del modelo Hec-RAS directamente para cada sección el número de Froude y el régimen del flujo. En el caso de IBER, se exportó la ubicación de las secciones transversales al modelo digital del terreno, se realizó un gráfico del número de Froude para cada sección y se calculó el valor medio para cada una aplicando el método de los momentos (ver Tabla 2).

En líneas generales, aunque haya algunas discrepancias en cuanto al valor numérico del Froude, el régimen del flujo en gran parte del tramo de estudio analizado es similar. Las celdas de color azul representan las secciones donde se obtuvieron discrepancias. En las secciones 23, 24 y 30 se observan diferencias en el régimen del flujo, precisamente ésta es la zona donde existe una isla central en el cauce del río. En este sentido, Hec-RAS al ser unidimensional calcula un mismo nivel de energía y del agua para los dos tramos que forman la bifurcación, IBER lo hace de forma independiente como se indicó anteriormente. El otro tramo donde existen diferencias de régimen es entre los dos puentes, en el que Hec-RAS presenta un resalto hidráulico y por consiguiente el cambio de régimen de supercrítico a subcrítico, mientras que IBER en este tramo, el flujo permanece supercrítico en promedio.

Tabla 2. Nro. De Froude y régimen del flujo en el tramo de estudio para el Opico

Sección	Nro. De Froude		Régimen	
	Hec-RAS	IBER	Hec-RAS	IBER
32 (415,84 m a. arriba Puente 1)	0,84	0,4	Subcrítico	Subcrítico
31 (393,00 m a. arriba Puente 1)	0,63	0,33	Subcrítico	Subcrítico
30 (372,92 m a. arriba Puente 1)	1,02	0,57	Supercrítico	Subcrítico
29 (357,22 m a. arriba Puente 1)	0,74	0,49	Subcrítico	Subcrítico
28 (338,73 m a. arriba Puente 1)	0,86	0,48	Subcrítico	Subcrítico
27 (318,65 m a. arriba Puente 1)	0,72	0,48	Subcrítico	Subcrítico
26 (298,32 m a. arriba Puente 1)	0,84	0,48	Subcrítico	Subcrítico
25 (277,97 m a. arriba Puente 1)	0,98	0,45	Subcrítico	Subcrítico
24 (257,84 m a. arriba Puente 1)	1,23	0,81	Supercrítico	Subcrítico
23 (237,94 m a. arriba Puente 1)	1	1,11	Crítico	Supercrítico
22 (217,85 m a. arriba Puente 1)	0,57	0,61	Subcrítico	Subcrítico
21 (196,98 m a. arriba Puente 1)	0,62	0,83	Subcrítico	Subcrítico
20 (159,56 m a. arriba Puente 1)	0,49	0,49	Subcrítico	Subcrítico
19 (130,00 m a. arriba Puente 1)	0,55	0,46	Subcrítico	Subcrítico
18 (114,67 m a. arriba Puente 1)	0,4	0,36	Subcrítico	Subcrítico
17 (91,62 m a. arriba Puente 1)	0,88	0,66	Subcrítico	Subcrítico
16 (69,34 m a. arriba Puente 1)	0,49	0,4	Subcrítico	Subcrítico
15 (48,82 m a. arriba Puente 1)	0,37	0,26	Subcrítico	Subcrítico
14 (27,51 m a. arriba Puente 1)	0,45	0,33	Subcrítico	Subcrítico
13 (8,76 m a. arriba Puente 1)	0,74	0,6	Subcrítico	Subcrítico
12 (8,76 a. abajo Puente 1 44,20 m a. arriba Puente 2)	1,21	1,39	Supercrítico	Supercrítico
11 (27,80 a. abajo Puente 1 25,17 m a. arriba Puente 2)	0,86	1,05	Subcrítico	Supercrítico
10 (43,65 a. abajo Puente 1 9,31 m a. arriba Puente 2)	0,46	1,04	Subcrítico	Supercrítico
9 (9,31 m a. abajo Puente 2)	0,53	1,63	Subcrítico	Supercrítico
8 (41,99 m a. abajo Puente 2)	3,47	1,68	Supercrítico	Supercrítico
7 (45,73 m a. abajo Puente 2)	1,46	2,22	Supercrítico	Supercrítico
6 (57,35 m a. abajo Puente 2)	1,34	1,79	Supercrítico	Supercrítico
5 (69,41 m a. abajo Puente 2)	2,47	1,79	Supercrítico	Supercrítico

3.5. Vectores de flujo en pilas

Unas de las principales ventajas que tienen los modelos bidimensionales, es que en ellos es posible analizar el comportamiento hidráulico del flujo en las inmediaciones de las pilas de los puentes. Este tipo de análisis no es posible en modelos unidimensionales como el Hec-RAS donde el mayor reporte que se puede obtener son las condiciones hidráulicas en las caras aguas arriba y aguas abajo del puente. En este sentido, en la figura 7 se pueden visualizar estos resultados, en el que se puede observar los cambios de trayectoria que tienen los vectores cuando bordean las pilas, y como entre ellas se forma una especie de remolino y zona

de velocidad mínima.

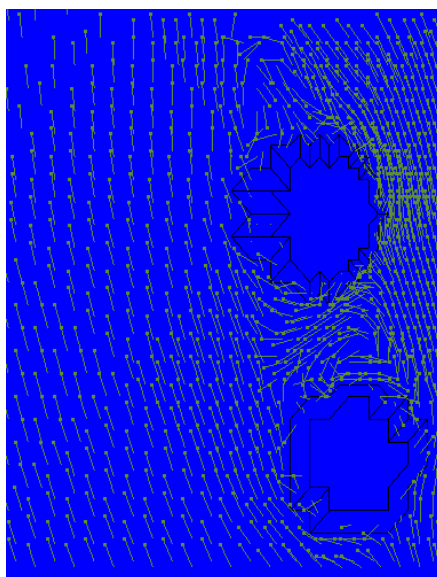


Figura 7. *Vectores de velocidad del flujo resultante con IBER en instante de Qpico y en pilas de puente existente*

3.6. Tiempos de corrida

En este punto de análisis las diferencias son considerables. La corrida en Hec-RAS tuvo una duración de 34 s mientras que en IBER, la duración de la corrida fue de 39 hr con 35 min.

4. CONCLUSIONES

Las comparaciones realizadas entre los modelos estudiados en este trabajo permitieron establecer las siguientes conclusiones:

- Los modelos bidimensionales demandan mayor tiempo en la preparación del esquema representativo del río, específicamente en la generación del modelo digital de elevación y la posterior malla de cálculo, en contraste con el modelo unidimensional en la que la geometría del río se representa a través de secciones transversales.
- Los resultados obtenidos en cada uno de los parámetros hidráulicos analizados en la simulación de la quebrada “La Guardia”, incluyendo los dos puentes existentes en los modelos Hec-RAS e IBER, se pudo observar que el comportamiento en ambas modelaciones presentó gran similitud en cuanto al perfil del flujo en su condición de caudal máximo como en el régimen del flujo. En el caso analizado, aguas arriba de los dos puentes predomina el régimen subcrítico, por consiguientes es donde se presentan las profundidades más altas y las velocidades más bajas. Lo contrario ocurre aguas abajo de los dos puentes, donde predomina el régimen supercrítico, las velocidades altas y las profundidades mínimas.

- En el análisis se apreciaron diferencias en el tramo de río localizado entre ambos puentes, por una parte, en Hec-RAS ocurre la formación de un resalto hidráulico que produce el cambio de régimen de supercrítico a subcrítico, mientras que en IBER el régimen se mantiene supercrítico, situación que se debe a las diferentes metodologías que aplican los softwares para la modelación del puente.
- Estudios en los que sea necesario analizar con mayor detalle el comportamiento hidráulico del flujo en pilas y estribos debe realizarse la modelación bidimensional, puesto que Hec-RAS (unidimensional) no ofrece resultados al respecto.
- La existencia de una isla central aguas arriba de los dos puentes, y considerando los resultados obtenidos en esta zona, se concluye que el empleo de un modelo bidimensional, es más apropiado, debido a que analiza de forma independiente la bifurcación.
- El comportamiento hidráulico del cauce y apreciable en las manchas de inundación obtenidas en cada uno de los softwares empleados, se evidenció que no existe ningún tipo de peligro de desbordamiento a lo largo de todo su recorrido.

Considerando lo expuesto anteriormente, se concluye que, para ríos con geometría simple y preferiblemente con un solo puente, el software unidimensional Hec-RAS se presenta como la mejor alternativa de uso debido a la facilidad en la introducción de datos y proporciona resultados confiables en un menor tiempo. El paquete IBER por ser bidimensional, representa una mejor opción para modelaciones de ríos con geometrías de mayor irregularidad, cuando se tiene especial interés en el comportamiento hidráulico del flujo a través de estribos y pilas, y cuando se tienen dos o más puentes con separación reducida.

5. RECONOCIMIENTO

Este trabajo es producto del proyecto de investigación titulado: “Estudio comparativo entre un modelo unidimensional y bidimensional en el análisis hidráulico de puentes. Caso de estudio: Puente sobre la Quebrada la Guardia, Municipio Jimenez, Estado Lara”, registrado en El Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico (CDCHT) de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA), bajo el código 001-IC-2013

6. REFERENCIAS

- [1] A. Rocha, “Introducción a la hidráulica de las obras viales”. Instituto de la Construcción y Gerencia, Lima, Perú, 2010.
- [2] J. Martin, “Ingeniería de Ríos”. Universidad Popular de La Chontalpa, Tabasco. México, 2004
- [3] J. Rincón, J. León, y J. Graterol, “Análisis comparativo de los modelos HEC-RAS y

- BRI-STARS en la evaluación hidráulica de puentes considerando el lecho fijo” Revista INGENIERÍA UC, vol 22, nº 3, pp. 41-51, 2015.
- [4] P. García, P. Brufau X, J. Murillo y C. Zorraquino. “Estudio hidráulico del riesgo de inundación en el meandro de ranillas: modelos de simulación numérica”, Ingeniería del agua, vol 10, pp. 115-125, 2003.
- [5] USACE. “HEC-RAS User’s Manual”. Version 4.1. US Army Corps of Engineers, Davis, 2010.
- [6] E. Bladé, L. Cea, G. Corestein, E. Escolano, J. Puertas, M.E. Vázquez-Cendón, J. Dolz, A. Coll. “Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos”. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, vol 30, nº 1, pp. 1-10, 2014.
- [7] J. Chacón y E. Pazmiño. “Análisis de flujo gradualmente variado no permanente y transporte de sedimentos con el modelo HEC-RAS”, Trabajo de grado. Escuela Politécnica Nacional Facultad de ingeniería civil y ambiente, Ecuador, 2010.
- [8] J. Bolinaga. “Drenaje urbano”, Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables, Caracas, Venezuela, 1979.
- [9] Sistema Hidráulico Yacambú-Quíbor. “Cálculo de niveles y estudio de socavación en los pases de quebrada de la aducción proveniente del embalse Yacambú”, Informe técnico, 2010.
- [10] M. García y J. Maza. “Origen y propiedades de los sedimentos”, Manual de Ingeniería de Ríos, 1990.
- [11] V.T. Chow. “Hidráulica de canales abiertos”. Editorial Mc-Graw Hill. Bogotá, Colombia, 2000.
- [12] L. Franceschi. “Drenaje Vial”. Ed. Fundación JJ Aguerrevere, Fondo Editorial del Colegio de Ingenieros de Venezuela, Caracas, Venezuela, 1984.