

NOTAS TÉCNICAS

Modelación hidráulica de un sector de río caudaloso con derivaciones empleando HEC-RAS

Ana Carolina Santos Rocha¹, Carlos Eduardo Cubillos Peña² & Andrés Vargas Luna³.

1 Maestría en Recursos Hidráulicos, Grupo GIREH, Universidad Nacional de Colombia-Bogotá.

2 Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia- Bogotá.

3 Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana- Bogotá.

acsantosr@unal.edu.co.

Recibido para evaluación: 31 de Agosto de 2007 / Aceptación: 06 de Mayo de 2008 / Versión Final: 27 de Mayo de 2008

Resumen

Dentro de la modelación hidráulica es importante identificar las ventajas y limitaciones de un modelo matemático. El objetivo del presente escrito consiste en reportar los resultados de un ejercicio de aplicación realizado para establecer la eficacia del modelo unidimensional HEC-RAS en la simulación del comportamiento hidráulico de un cauce que presenta bifurcaciones y derivaciones de gran caudal, como es el caso del río Magdalena en proximidades al Canal del Dique. Con base en mediciones de campo realizadas en junio de 2005 (aforos y barimetrías) y registros hidrométricos de caudal y nivel en dos estaciones (Calamar en el río Magdalena e INCORA K7 en el Canal del Dique), se realizó la calibración del modelo; se desarrolló un proceso de validación simulando un hidrograma de entrada correspondiente al período comprendido entre el 1° de junio de 2004 y el 1° de noviembre de 2005, y comparando los resultados con el hidrograma de caudal registrado en la estación INCORA K7, situada a aproximadamente 7 kilómetros de la embocadura del Canal del Dique. Los resultados obtenidos evidencian la efectividad del modelo y su alta capacidad predictiva para tales condiciones.

Palabras Clave: HEC-RAS, Modelación hidráulica, Calibración, Validación.

Abstract

In hydraulic modeling is important to identify the advantages and disadvantages of a mathematical model. The aim of the present paper consists in to report the results of an exercise of application realized to establish the one-dimensional HEC-RAS model efficiency in simulating hydraulic behavior of a river with high flow branches and diversions, considering the Magdalena River near Canal del Dique. Based on field data collected in June 2005 (discharge and transversal sections measurements) and hydraulic information of discharges and levels in two gauging stations (Calamar in the Magdalena River and INCORA K7 in the Dique Channel). The model calibration was performed, subsequently, a validation processes was developed using an entrance hydrograph between 1st June 2004 and 1st November 2005, and comparing with the registered hydrograph in the INCORA k7 station located close to the Dique Channel entrance. The results prove the model efficiency and his high predictive capability in that conditions.

Key Words: HEC-RAS, Hydraulic modeling, Calibration, Validation.

1. Introducción

Ocasionalmente se pueden presentar en sistemas fluviales grandes difluencias de flujo, tanto naturales como artificiales, en las que es necesario conocer y predecir los caudales de cada uno de sus brazos, ya que esta información es útil en el planeamiento, la toma de decisiones y el desarrollo de proyectos de construcción de obras de control o de navegación. Este es el caso del río Magdalena que, a la altura de la población de Calamar, presenta un cauce con islas así como la derivación del Canal del Dique, un canal artificial construido en 1650 que actualmente conduce parte de sus aguas a la bahía de Cartagena. Estudios anteriores de la hidrodinámica del Canal del Dique (UNINORTE, 1999, 2001 y 2003), no han considerado la interacción entre dicho canal y el río Magdalena.

La derivación de material sólido por el Canal del Dique es un problema que ha repercutido en el realce del fondo en la bahía de Cartagena y en unas cuantas secciones transversales del Canal. En particular, el principal problema que experimenta la embocadura del Canal del Dique, es su alto transporte de sedimentos, aspecto que está directamente relacionado con las rectificaciones o variaciones en su sección transversal y su trazado, llevadas a cabo durante el último siglo.

En el presente trabajo se reportan los resultados de un ejercicio de aplicación realizado para establecer la eficacia del modelo

unidimensional HEC-RAS en la simulación del comportamiento hidráulico de un cauce que presenta bifurcaciones y derivaciones de gran caudal, como es el caso del río Magdalena en proximidades al Canal del Dique, como una contribución al propósito de predecir el caudal derivado por el Canal del Dique con base en el conocimiento de las condiciones hidráulicas del río Magdalena.

De hecho, un modelo calibrado es una herramienta vital para la toma de decisiones en proyectos de intervención de un cauce natural. En cualquier caso, la elección de la herramienta computacional depende de la disponibilidad de información y del alcance esperado en los resultados de dicha modelación. Para la presente aplicación se utilizó el modelo HEC-RAS (USACE, 2002a y 2002b) versión 3.1.3, teniendo en cuenta que en estudios realizados en el país con diferentes objetivos, dicho modelo había demostrado un buen desempeño.

2. Zona de Interés

Corresponde al tramo inferior del río Magdalena, en el norte de Colombia, entre las localidades de Barrancanueva y San Pedrito, a unos 110 km de su desembocadura en Bocas de Ceniza. También incluye 10 km de Canal del Dique, el cual es una difluencia a partir del Magdalena frente a la población de Calamar, que después de un recorrido de 115 km desemboca en la bahía de Cartagena. En la Figura 1 se presenta la

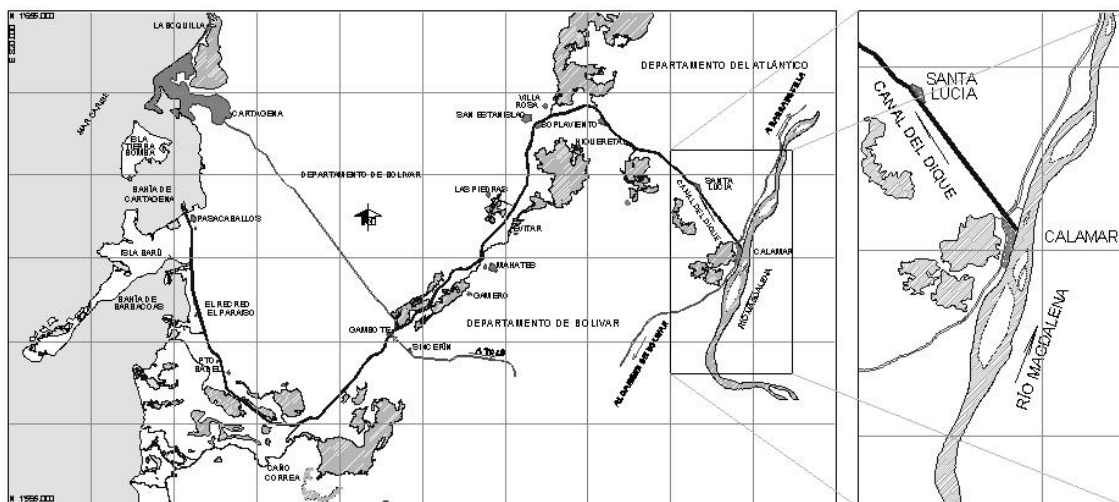


Figura 1. Localización de la zona de estudio.

3. Información utilizada

3.1. Topobatimetría

El modelo requiere de las secciones transversales del tramo de estudio en las cuales debe definirse su canal principal y la zona de inundación sobre las márgenes izquierda y derecha; los factores de rugosidad de Manning para cada uno de estos sectores, la distancia central, por la izquierda y la derecha hasta la sección siguiente aguas abajo. En el presente caso no se definieron canales de inundación por ser innecesarios para las condiciones hidrológicas analizadas. En la Figura 2 se presenta la topología empleada en la modelación.

El levantamiento batimétrico fue realizado por el Laboratorio de Ensayos Hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia (LEH -UN) durante los días 13 a 18 de junio de 2005 en un tramo de 14,5 km de longitud (K0+000 hasta K14+500) en el río Magdalena, y de 1,2 km (K1+900 hasta K0+700) en el Canal del Dique. Las secciones trasversales, por lo general, fueron tomadas cada 50 metros. Se utilizó un equipo GPS PROMAK II con precisión submétrica y corrección satelital, para la medición de coordenadas norte, este y cota. Para la toma de las profundidades se empleó una ecosonda Raytheon DM con una precisión de 10 cm.

En total se obtuvieron 431 secciones sobre el Río Magdalena y 24 para el Canal del Dique, cuya distribución se presenta en la Tabla 1.

Sólo se contó con una sección transversal en el brazo denominado Inter_islas; la cual se replicó 5 veces para describir el tramo en el modelo, estableciendo sus cotas según la pendiente del cauce en el sector. En el Canal del Dique, la batimetría del 2005 sólo incluyó secciones desde el K0 hasta el K1+200, las demás secciones (K2 hasta K10) fueron suministradas por el LEH-UN correspondientes a una campaña de medición realizada en estudios anteriores. Esto se hizo para extender la modelación hasta el sitio de la estación INCORA K7.

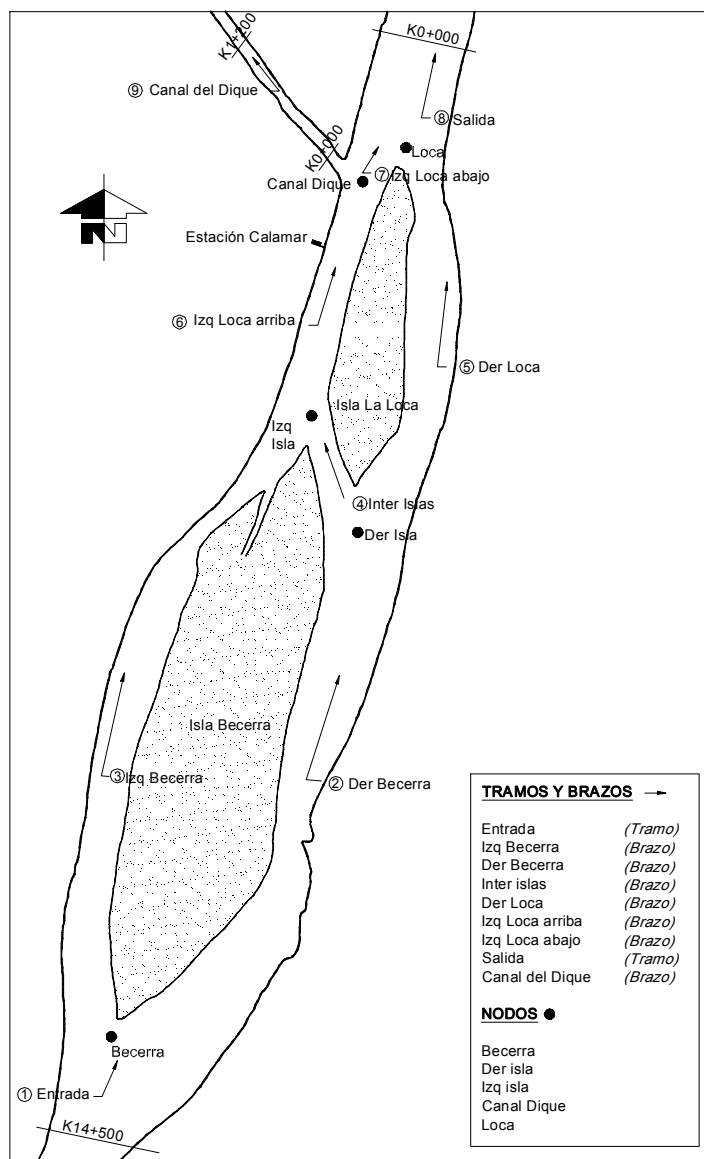


Figura 2. Topología de la zona de estudio.

Tabla 1. Secciones introducidas al modelo.

Id	Brazo	Número Secciones	Abscisas	Localización
1	Entrada	78	K14+500 – K9+650	Sector de Barrancanueva
2	Der Becerra	104	K9+600 – K4+400	Derecha de la Isla Becerra
3	Izq Becerra	108	K9+600 – K4+200	Izquierda de la Isla Becerra
4	Inter Islas	6	K4+350 – K4+100	Diagonal entre las Islas Becerra y La Loca
5	Der Loca	57	K4+355 – K1+550	Derecha de la Isla La Loca
6	Izq Loca arriba	50	K4+100 – K1+650	Izquierda de la Isla La Loca aguas arriba de la derivación hacia el Canal del Dique
7	Izq Loca abajo	2	K1+600 – K1+550	Izquierda de la Isla La Loca aguas abajo de la derivación hacia el Canal del Dique
8	Salida	31	K1+500 – K0+000	Sector de San Pedrito
9	Canal del Dique	34	K10+000 – K0+000	Desde Calamar (K0+000) hasta Santa Lucia (K10+000)

3.2. Aforos líquidos

Para la calibración del modelo se utilizó la información batimétrica y de aforos líquidos levantada por el LEH -UN en la campaña de junio de 2005. En la Tabla 2 se presenta el mejor estimativo de la distribución de caudales en cada tramo considerado, ajustada de acuerdo con la ley de conservación de masa, condición obvia exigida por el modelo, para lo cual, también se utilizó la información de los aforos líquidos realizados en los años 2002, 2003 y 2006.

3.3. Información hidrométrica

A manera de verificación, se consultaron los registros de las estaciones hidrométricas de Calamar e INOCORA K7 del IDEAM, correspondientes a las fechas de la campaña de medición de 2005, (Véase Tabla 3).

Tabla 2. Caudales ajustados y aforos.

Brazo	Caudal derivado por cada brazo (m ³ /s)			
	Nov-02	Nov-03	Feb-06	Jun-05
Entrada	7900	8899	6316	7952
Izq Becerra	1975	2815	1782	2057
Der Becerra	5925	6084	4534	5895
Inter islas	1106	1429	760	1146
Der Loca	4819	4655	3774	4749
Izq Loca arriba	3081	4244	2542	3203
Izq Loca abajo	2473	3503	2112	
Salida	7292	8158	5886	7489
Canal del Dique	608	741	430	463

Tabla 3. Registro de niveles y caudales de las estaciones INCORA K7 y Calamar correspondiente al periodo junio 13 a 18 de 2005.

Día	Hora	CALAMAR			Promedio	INCORA K7			
		Nivel (m)	Promedio (m)	Caudal (m³/s)		Nivel (m)	Promedio (m)	Caudal (m³/s)	Promedio (m³/s)
Jun-13	06:00 a.m.	6.6	6.61	9513.92	9540.02	6.14	6.15	709.54	711.46
	06:00 p.m.	6.62		9566.13		6.16		713.38	
Jun-14	06:00 a.m.	6.64	6.66	9618.6	9671.48	6.14	6.16	709.54	713.38
	06:00 p.m.	6.68		9724.35		6.18		717.22	
Jun-15	06:00 a.m.	6.68	6.69	9724.35	9750.99	6.2	6.21	734.27	736.71
	06:00 p.m.	6.7		9777.63		6.22		739.14	
Jun-16	06:00 a.m.	6.72	6.73	9831.17	9844.61	6.25	6.25	745.26	746.49
	06:00 p.m.	6.73		9858.04		6.26		747.72	
Jun-17	06:00 a.m.	6.74	6.75	9884.98	9898.49	6.26	6.26	747.72	748.95
	06:00 p.m.	6.75		9911.99		6.27		750.18	
Jun-18	06:00 a.m.	6.78	6.79	9993.43	10020.74	6.26	6.27	748.95	751.42
	06:00 p.m.	6.8		10048.06		6.28		753.88	

Como se puede observar, el caudal registrado en la estación Calamar es, en general, mayor al caudal medido en el tramo "Entrada" de la Tabla 2, en un 17 % aproximadamente; hecho que se puede atribuir a múltiples causas relacionadas con la precisión de los registros de hidrométricos y a que los valores de la Tabla 2, como se ha dicho, han sido ajustados a partir de aforos no simultáneos, con el fin de suministrar al modelo las condiciones de distribución de caudal. La Tabla 4 presenta los caudales establecidos como condición inicial al modelo HEC-RAS, tomando como referencia el caudal observado en la estación de Calamar el día 13 de junio de 2005.

En la etapa de validación se utilizaron hidrogramas de caudal estimados a partir de las lecturas de niveles del río Magdalena y del Canal del Dique, en las estaciones Calamar e INCORA K7, respectivamente, correspondientes al período comprendido entre el 01 de Junio de 2004 a las 06:00 a.m. y el 11 de noviembre de 2005 a las 06:00 a.m., de acuerdo con la información suministrada por el IDEAM.

4. Calibración del modelo

4.1. Parámetros hidráulicos

Para realizar una simulación empleando HEC-RAS, es necesario determinar el tipo de flujo con el que se va a trabajar y establecer las condiciones iniciales y de frontera para ejecutar la simulación.

En el presente estudio se optó por la condición de flujo no permanente, debido a que la calibración de los factores de rugosidad se realizaría a partir de la correcta reproducción de hidrogramas registrados en las estaciones hidrométricas de control seleccionadas. Para el efecto, se realizó una calibración multiobjetivo.

4.2. Condiciones de frontera

Se establecieron las siguientes condiciones de frontera: (véase Figura 2):

- * Condición de caudal y nivel en el brazo "Entrada", en la abscisa K14+500
- * Condición de nivel en el brazo "Salida", en la abscisa K0+000
- * Condición de profundidad normal en el brazo "Canal del Dique" en Santa Lucía, en la abscisa K10+000

Debido a las limitaciones de información, la pendiente de la línea de energía en el Canal del Dique se dedujo a partir de los datos de los aforos bajo una suposición de flujo uniforme.

4.3. Estimación del coeficiente de rugosidad de Manning

Para precisar el coeficiente de rugosidad (n de Manning) para el río Magdalena en el sector de interés, se realizaron varios

ensayos numéricos suponiendo diferentes valores posibles de dicho coeficiente en cada uno de los brazos; de esta manera se seleccionaron los resultados para las condiciones en las cuales

se obtuvo el caudal derivado por cada brazo más próximo al caudal previamente definido para cada uno de ellos. Los resultados de esta calibración se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4. Condiciones de calibración.

Tramo	Caudal derivado		Observado (%)	Simulado (%)	Coeficiente de Rugosidad n	Pendiente de energía
	Observado (m^3/s)	Simulado (m^3/s)				
Entrada	9540	9757,85	100%	102.3%	0,031	0,00009
Brazo Izq Becerra	2480	2386,56	26%	25.0%	0,029	0,00007
Brazo Der Becerra	7060	7371,35	74%	77.3%	0,030	0,00004
Brazo Inter islas	1336	1408,60	14%	14.8%	0,028	0,00007
Brazo Der Loca	5724	5962,77	60%	62.5%	0,023	0,00007
Brazo Izq Loca arriba	3816	3793,61	40%	39.8%	0,028	0,00006
Brazo Izq Loca abajo	3148	3127,20	33%	32.8%	0,025	0,00006
Salida	8872	9089,98	93%	95.3%	0,030	0,00009
Canal del Dique	668	668,00	7%	7.0%	0,022	0,00005

Dado que las diferencias entre el caudal observado y el simulado son inferiores al 5%, se concluye que los valores del coeficiente de rugosidad n de Manning son adecuados. Puesto que se realizó una calibración multiobjetivo, se verificó que los resultados obtenidos al variar el coeficiente de rugosidad, n de Manning, en cada brazo, también reprodujeran los niveles de la lámina de agua medidos en el levantamiento topobatimétrico, en cada una de las secciones consideradas, como se muestra en la Tabla 5.

Durante el proceso desarrollado se dio gran importancia a la reproducción del nivel de agua en las estaciones Calamar e INCORA K7. Para la sección transversal correspondiente a la estación Calamar se conoce el nivel del agua de la batimetría (6,44 m.s.m.m.); sin embargo, en la estación INCORA K7, no se cuenta con tal información debido a que la batimetría en el Canal del Dique se realizó solo hasta el km 1 + 200, y la estación se encuentra en el km 7 (a partir de la embocadura del Canal en el río Magdalena).

Para estimar el nivel de agua en la estación INCORA K7 correspondiente al caudal derivado por el Canal del Dique en

junio de 2005, se utilizó una curva de calibración suministrada por el LEH-UN (válida para una cota inferior a 6,2 m.s.n.m.), deduciéndose de esta manera un nivel de 5.92 m.s.n.m. La ecuación de la curva de calibración empleada es:

$$Q = 22,02 \cdot (H + 0,6)^{1,82}$$

Tabla 5. Diferencias en el nivel de agua obtenidas en la calibración.

Sector	Diferencia de alturas (m)	Sector	Diferencia de alturas (m)
Entrada	0,09	Izq_Loca_abajo	0,06
Der_Becerra	0,12	Der_Loca	0,06
Inter_islas	0,06	Salida	0,05
Izq_Becerra	0,07	Canal del Dique	0,14
Izq_Loca_arriba	0,07		
Nivel en Calamar	0,05	Nivel en INCORA K7	0,1

Estas diferencias en la mayoría de los sectores son inferiores a los 10 cm, excepto en 12 de las 470 secciones transversales involucradas en el cálculo.

4.4. Verificación con otros aforos

Con la información de los aforos mostrada en la Tabla 2 se ejecutó una simulación con el fin de verificar el comportamiento del modelo ya calibrado, para otras condiciones de caudal. Para ello se mantuvieron las condiciones de frontera establecidas en la calibración, excepto en el brazo "Salida" donde se introdujo un valor de profundidad normal, mientras que en el Canal del Dique, se impuso la condición de flujo uniforme.

La distribución de caudales obtenida en los 9 brazos para 4 condiciones de caudal diferentes, se presenta en la Figura 3, donde se comparan con los caudales aforados.

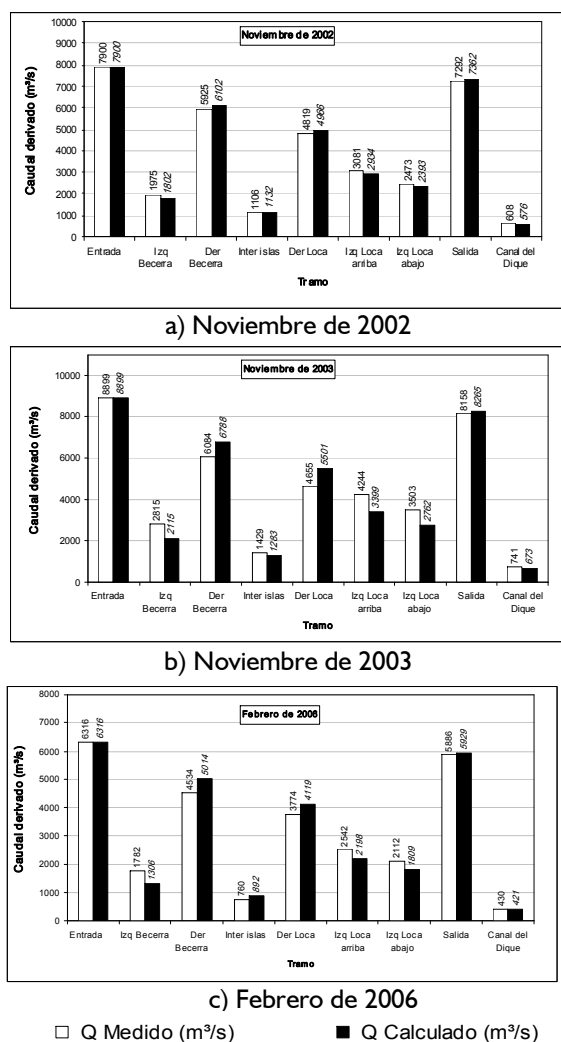


Figura 3. Verificación del modelo calibrado para diferentes condiciones de caudal medidas.

En general, se observa una buena correspondencia entre los valores calculados y medidos. Los sectores donde las diferencias son mayores, corresponden al brazo izquierdo de la isla La Loca y al brazo derecho de la isla Becerra, lo cual se puede explicar por la dinámica del río que afecta la configuración de la sección transversal y, por lo tanto, su capacidad de conducción de flujo.

5. Validación del Modelo para Flujo no Permanente

Se realizó esta validación comparando un hidrograma calculado por el modelo, con el correspondiente hidrograma registrado en la estación INCORA K7 en el Canal del Dique, para una duración de 18 meses. Las condiciones de frontera impuestas fueron: profundidad normal en el Canal de Dique y en el tramo "Salida" (deducida para las mismas condiciones de pendiente establecidas en la etapa de calibración) y un hidrograma de Caudal en el brazo "Entrada". El hidrograma elegido proviene del registro de la estación Calamar del período comprendido entre el 01 de junio de 2004 y el 11 de noviembre de 2005.

En la Figura 4 se presentan los resultados obtenidos en esta simulación para la localidad de INCORA K7. De acuerdo con lo que allí se observa, la diferencia entre los dos hidrogramas es mínima, como lo indica el coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0,98, obtenido. Los periodos de mayor diferencia se encuentran comprendidos entre el 22 de marzo y 5 de abril de 2005 para condiciones de bajo caudal. Estos resultados permiten destacar que el modelo calibrado se comporta adecuadamente para un amplio rango de caudales (300 m³/s a 1100 m³/s).

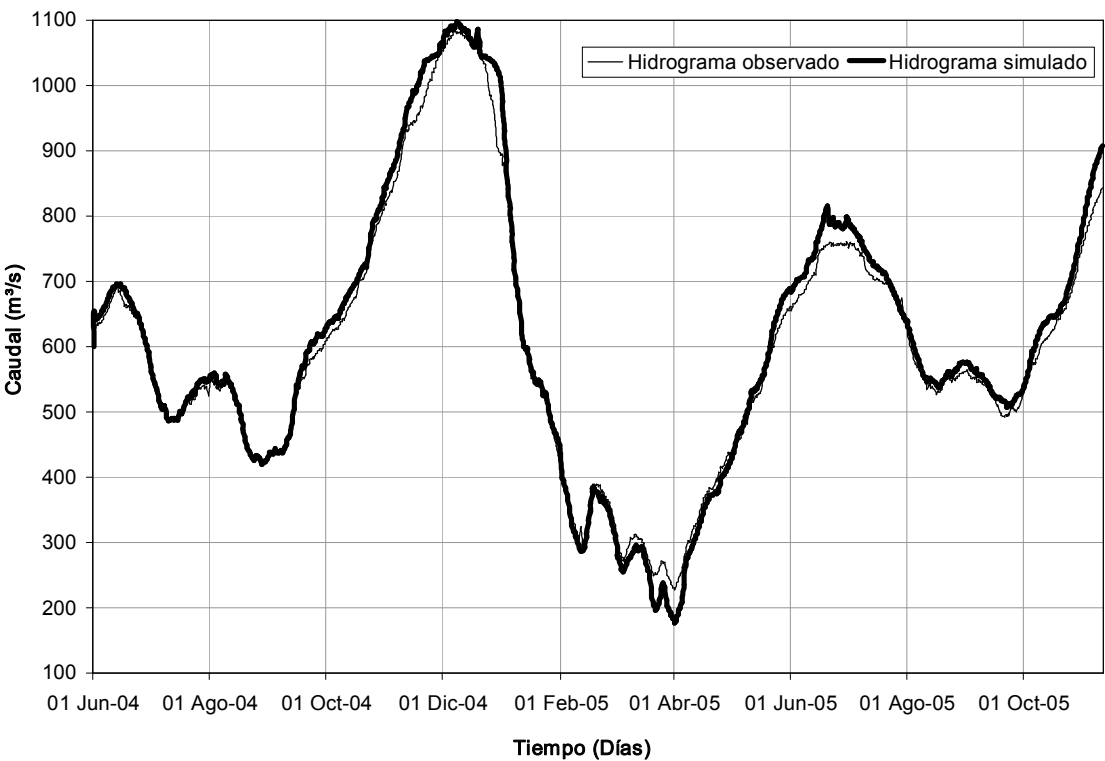


Figura 4. Comparación entre el hidrograma real y el calculado en INCORA K7 para el período 01 de junio de 2004 a 03 de noviembre de 2006.

6. Resultados de la Modelación Hidráulica

Como resultado de la calibración del modelo HEC-RAS se construyeron "Curvas de derivación" que relacionaran el caudal en la sección de "Entrada" con el correspondiente a los 8 brazos restantes del río, imponiendo las mismas condiciones de frontera utilizadas en el proceso de validación para flujo permanente.

En la Tabla 6 se muestran las ecuaciones de correlación y su coeficiente de determinación encontrados para cada sector del río Magdalena en consideración.

Tabla 6. Ecuaciones y coeficientes de determinación para la relación del caudal en el tramo "Entrada" y los demás brazos del esquema de modelación.

Tramo	Ecuación (*)	R ²
Q Der_Becerra	y = 0.6867x + 676.99	0.9968
Q Inter_islas	y = 0.1516x - 65.734	0.9882
Q Izq_Becerra	y = 0.3133x - 673.24	0.9997
Q Izq_Loca_arriba	y = 0.4648x - 737.63	0.9986
Q Izq_Loca_abajo	y = 0.3692x - 523.19	0.9987
Q Der_Loca	y = 0.5351x + 739	0.9992
Q Salida	y = 0.9042x + 218.37	0.9987
Q Canal del Dique	y = 0.0976x - 195.32	0.9952

(*) x Corresponde al caudal en el tramo de "Entrada"

Como se mostró en la Tabla 4, los valores del coeficiente de rugosidad, n , resultantes de la calibración, en el rango de 0.022 a 0.031 se consideran razonables para este tipo de río. Se observa que los coeficientes de rugosidad son similares en los tramos "Entrada" y "Salida", y superiores a 0,03, mientras que en los demás brazos el coeficiente resulta menor a 0,03, justo donde la información topobatemétrica y de caudales es mas escasa y la dinámica fluvial más evidente.

En cuanto a los niveles de la lámina de agua simulados, presentan diferencias de hasta 14 cm en el Canal del Dique, lo cual se atribuye a que la información topográfica utilizada no pertenece a un mismo levantamiento.

Las diferencias entre los niveles simulado y medido en cada uno de los brazos, en general, son menores a 10 cm, lo que se considera aceptable tomando en cuenta que la precisión del equipo con el que se realizó el levantamiento es del mismo orden de magnitud para cauces del tamaño del río Magdalena.

En el proceso de verificación con otros regímenes hidrológicos, el período que mejor ajusta a las condiciones de calibración del coeficiente de rugosidad del aforo de junio 2005, es el aforo de noviembre de 2002. Por otra parte, la mayor diferencia entre el caudal simulado y el caudal observado (un 27 %) corresponde a las condiciones del aforo de febrero de 2006, en el sector de la izquierda de la isla Becerra.

Respecto a la reproducción de un hidrograma en la sección de la estación INCORA K7 en el Canal del Dique, se encuentra que la mayor diferencia entre los caudales calculados y registrados es del 23%, lo que sumado al hecho de obtener un alto coeficiente de Nash-Sutcliffe, es posible concluir que la calibración del factor de rugosidad, resulta adecuada para representar la derivación de flujo hacia el Canal del Dique.

Como se ha anotado, se encontró una relación lineal entre el caudal de "Entrada" al tramo de interés y el de cada uno de los brazos, con excelentes ajustes (coeficientes de determinación entre 0,9997 y 0,9952). Además, se observa una gran similitud al comparar la relación encontrada para el Canal del Dique, con la obtenida a partir de todo el registro de aforo de caudal del IDEAM en el sector (LEH-UN, 2006). En dicho análisis de referencia se advierte que, efectivamente, la relación de derivación observada en el Canal del Dique, es de tipo lineal.

7. Conclusiones

Según el trabajo realizado, se concluye que el modelo hidráulico unidimensional HEC-RAS es aplicable a ríos de gran tamaño con flujos difluentes, confluencias, derivaciones, de baja pendiente, ya que permite representar con suficiente precisión la distribución de caudales en los diversos tramos, bajo condiciones de flujo permanente y no permanente, lo cual se ha podido evidenciar en el caso del Canal del Dique, la principal derivación del sector aquí estudiado.

Se destaca como una limitación del modelo HEC-RAS la falta de un módulo de calibración, que le permita al usuario acercarse a los valores óptimos de los parámetros a calibrar, y evitar de esta manera la exhaustiva tarea que implica una calibración multiobjetivo realizada manualmente.

Para realizar un análisis más completo de la modelación hidráulica de ríos de gran tamaño, se recomienda lo siguiente:

- * Extender el levantamiento topográfico de las secciones transversales para poder determinar el talud de las orillas y las planicies de inundación.
- * Realizar aforos simultáneos o siguiendo la masa de agua, cuando se requieran para la calibración de modelos

En aplicaciones futuras, se recomienda el uso opciones de modelación de transporte de sedimentos y contaminantes, pues, infortunadamente, en la versión aquí utilizada del modelo HEC-RAS no se contaba con tales opciones, pero la pregunta de la efectividad y aplicabilidad del modelo en estos aspectos queda abierta.

Referencias

- Santos A., 2006. Modelación hidráulica unidimensional del río Magdalena en el sector del Canal del Dique. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniera Civil, Universidad Nacional de Colombia.
- Brunner, G. W., 2002a. HEC-RAS: River analysis system hydraulic reference manual, Hydrologic Engineering Center, United States Army Corps of Engineers USACE.

Brunner, G. W., 2002b. HEC-RAS: River Analysis System User's Manual, Hydrologic Engineering Center, United States Army Corps of Engineers USACE.

Universidad del Norte, Instituto de Estudios Hidráulicos y Ambientales de la Universidad del Norte - IDEHA, 1999. Factibilidad Plan de Restauración Ambiental del Ecosistema del Canal del Dique.

Universidad del Norte, Instituto de Estudios Hidráulicos y Ambientales de la Universidad del Norte - IDEHA, 2001. Bajo Magdalena y Canal del Dique. Caracterización hidrosedimentológica y geométrica. E-089-002.

Universidad del Norte, Instituto de Estudios Hidráulicos y Ambientales de la Universidad del Norte - IDEHA, 2003. Caracterización Hidráulica y Sedimentológica del Canal del Dique - Ideha-E-063-019-03

Universidad Nacional de Colombia - Cormagdalena, 2006. Estudios e investigaciones de las obras de restauración ambiental y de navegación del Canal del Dique.