

MODELACIÓN DISTRIBUIDA DEL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL EN LA CUENCA DEL RÍO TERCERO-CARCARAÑA

Hernán R. Stenta^{1,2}, Gerardo A. Riccardi^{1,2,3}, Pedro A. Basile^{1,2}

1 Departamento de Hidráulica – Escuela de Ingeniería Civil (FCEIA – Universidad Nacional de Rosario).

2 Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales (FCEIA – Universidad Nacional de Rosario)

3 Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario.

Riobamba 245 bis. (2000) Rosario – Santa Fe - Argentina- Tel: + 54 341 4808541

E-mail: hstenta@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

Se presentan avances en la descripción del escurrimiento superficial en la red de cursos de mayor jerarquía llevados a cabo mediante el ajuste de los parámetros de resistencia al escurrimiento y de gasto en un grupo de secciones de la red hídrica principal de la cuenca del río Tercero-Carcaraña. Para el ajuste se utiliza una metodología basada en la comparación de las curvas altura-caudal obtenidas mediante modelación matemática distribuida de la cuenca y curvas presentadas en trabajos antecedentes por Díaz Lozada et al. (2015) donde realizaron la cuantificación del escurrimiento superficial de la cuenca río Carcaraña obteniendo curvas altura-caudal calibradas en diferentes secciones de los ríos Tercero, Carcaraña y arroyo Tortugas. Los coeficientes hallados de resistencia al flujo en ríos y valle y coeficiente de gasto en puentes se encuentran dentro del rango de valores aceptados en la bibliografía. Los resultados obtenidos en la comparación en 7 sitios son satisfactorios cuantificándose en términos de $R^2 > 0.95$, PBIAS $< 13\%$ y NMAE $< 20\%$ en 5 sitios. Se concluye que un mejoramiento de la descripción hidráulica del escurrimiento tanto en cauce como en valle se logrará con un aumento de la densidad de la información geométrica y topográfica.

ABSTRACT

Advances in the description of surface runoff in the network of river taken by adjusting of parameters of resistance and discharge coefficient into a set of sections of the main hydric network of the Tercero-Carcaraña river basin are presented. For the adjustment process is used a methodology based on the comparison of level-discharge curves obtained through distributed mathematical modeling of the basin and the level-discharge curves presented by Lozada Diaz et al. (2015) where they have done the quantification of runoff from the river basin Carcaraña obtaining stage-discharge curves calibrated in different sections of the Tercero and Carcaraña rivers and Tortugas stream. Both resistance coefficients in rivers and floodplain and discharge coefficient are found in the value range accepted in the bibliography. The results obtained for comparison into 7 sites are satisfactory quantified in terms of $R^2 > 0.95$, PBIAS $<13\%$ and NMAE $<20\%$ into 5 sites. While the results were acceptable, it is concluded that an improvement of water runoff description both channel and floodplain can be achieved with increased density of the geometric and topographical information.

INTRODUCCIÓN

La representación de la dinámica del escurrimiento superficial mediante modelación matemática resulta de importancia para sus diversas aplicaciones; tales como utilización en sistemas de alerta de inundaciones, delimitación de zonas de vulnerabilidad, impacto de obras de infraestructura (carreteras, terraplenes), impacto de desarrollo de ciudades, evaluación y diagnóstico de la situación actual, y estudio e impactos de obras destinadas al saneamiento hídrico. Asimismo la alternativa de implementar y poner en operación un modelo matemático distribuido hidrológico-hidráulico físicamente basado que permita describir adecuadamente la generación del escurrimiento superficial y su propagación tanto por el curso principal como por el valle de inundación, constituye una poderosa herramienta de gestión del recurso hídrico que convenientemente utilizada puede aportar no solo al conocimiento y descripción de los mecanismos preponderantes del escurrimiento superficial sino a la solución concreta de diferentes problemáticas emergentes a lo largo de toda la cuenca. Además, una adecuada

herramienta de modelación superficial en este caso por evento aporta conocimiento allanando el camino hacia una posible futura modelación continua no solo superficial sino subterránea. Sin duda que alcanzar este último logro implica un gigantesco esfuerzo computacional, la obtención inicial de una gran cantidad de datos y la provisión continua de otra gran cantidad de datos provenientes de mediciones hidrometeorológicas, hidrológicas e hidráulicas que hoy no se cuenta, no obstante el avance en la modelación distribuida es una etapa rigurosamente necesaria para alcanzar otros logros superadores

En la cuenca hidrográfica de los ríos Tercero-Carcaraña se han realizado diferentes estudios y trabajos orientados a la descripción general de sus características más relevantes desde el punto de vista de los recursos hídricos, aspectos ambientales y socio-políticos.

Paoli et al. (2000) presentan una descripción general del área perteneciente a la cuenca del río Carcaraña, pero con el detalle descriptivo de la cuenca del Plata y subcuencas de los ríos Paraguay y Paraná. Los autores realizan una descripción general de las características físicas, geológicas, geomorfológicas y climatológicas de las cuencas de aporte al tramo medio del río Paraná, entre las cuales se encuentra la cuenca del sistema Tercero-Carcaraña.

Giacosa et al. (2000) realizan una caracterización hidrológica a nivel general del tramo medio del río Paraná donde se incluye a la cuenca del río Carcaraña como área de aportes. Asimismo realizan una caracterización hidrométrica del río Carcaraña, realizando un trabajo estadístico sobre caudales anuales y mensuales a partir de la información existente de la estación Pueblo Andino.

La Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (SSRHN, 2014) presenta un reporte descriptivo de las cuencas hídricas de la República Argentina, entre la que se encuentra la cuenca del río Carcaraña. En dicho trabajo se realiza la descripción general de aspectos físicos-naturales; hidrológicos y socio-económicos de dicha cuenca, remarcando que resultan aspectos descriptivos.

Venencio (2007) realizó una detallada caracterización física regional de la cuenca del río Carcaraña en la provincia de Santa Fe con el principal objetivo de investigar la vinculación regional entre la variabilidad climática y la respuesta del acuífero libre y para estimar cuantitativamente la recarga natural al acuífero libre debido a la lluvia a través de aplicación de diferentes metodologías. Se abordan aspectos de la geología e hidrogeología; geomorfología; dinámica hídrica superficial; características de suelos y cobertura vegetal; hidroquímica y caracterización de la precipitación.

FCEIA (2011), Basile et al. (2013) y Riccardi et al. (2013 a y 2013 b) llevaron a cabo estudios de prefactibilidad para el aprovechamiento del río Tercero-Carcaraña como ruta fluvial navegable. En tales trabajos se realizó una recopilación de antecedentes y se llevaron a cabo estudios básicos incluyendo la caracterización del área en estudio; la caracterización climática, los estudios de niveles hidrométricos y de caudales, las características generales de la traza actual del río Carcaraña y obras de arte principales.

Barchiesi et al. (2013) reportan los resultados obtenidos durante las campañas de monitoreo del río Carcaraña (hasta su desembocadura en el río Coronda) y sus principales tributarios (ríos Tercero y Saladillo) que incluyen la determinación de caudales y parámetros hidráulicos como

profundidad y velocidades media, pendiente de la superficie libre, entre otras, en distintas secciones.

La revisión del estado del arte indica que no se ha avanzado en profundidad respecto a modelación matemática distribuida del escurrimiento superficial en todo el ambiente hidrográfico de la cuenca. En este sentido, Stenta et al. (2014) realizaron un avance implementando un modelo matemático cuasi-2D en toda la cuenca y realizando a partir de eventos observados la calibración preliminar de parámetros y analizando áreas de incidencias sobre caudales máximos en una serie de puntos sobre la red de drenaje principal.

Por otro lado, Díaz Lozada et al. (2015) realizaron un trabajo de cuantificación del escurrimiento superficial de la cuenca río Carcarañá obteniendo, entre otros resultados, curvas altura-caudal calibradas en diferentes secciones de los ríos Tercero, Carcaraña y arroyo Tortugas mediante campañas de aforo utilizando un perfilador de corriente acústico doppler (ADCP). A partir de los resultados reportados por Díaz Lozada et al. (2015) se realiza el ajuste de los parámetros de resistencia al escurrimiento y de gasto en la red principal de la cuenca del río Tercero-Carcaraña. Para alcanzar el ajuste de los parámetros se comparan y cuantifican las curvas altura-caudal aforadas versus las curvas altura-caudal obtenidas mediante modelación matemática distribuida de la cuenca.

OBJETIVOS

El objetivo principal del trabajo es avanzar en el mejoramiento de la descripción hidrodinámica del escurrimiento superficial en la red de cursos de mayor jerarquía de la cuenca del río Tercero-Carcarañá a nivel de evento.

Como objetivo específico se plantea la determinación de parámetros de resistencia al escurrimiento y de los coeficientes de gasto en diferentes secciones transversales de la red de cursos. El ajuste se realiza considerando rangos admisibles de parámetros de resistencia al escurrimiento y de gasto; adoptando los valores que mejor ajusten a las curvas altura-caudal aforadas y presentadas en el trabajo de Díaz Lozada et al. (2015).

MATERIALES Y MÉTODOS

Breve Descripción Modelo Matemático

Para la modelación matemática distribuida se utilizó el sistema de modelación matemático hidrológico-hidráulico, físicamente basado y espacialmente distribuido cuasi-bidimensional denominado VMMHH 1.0 (Riccardi et al., 2013c). El sistema básicamente se conforma de una plataforma de pre y post procesamiento de datos y resultados y un algoritmo matemático de modelación. El modelo VMMHH 1.0 está basado en el esquema de celdas interconectadas originalmente propuesto por Cunge (1975). Las ecuaciones gobernantes consideradas son la de continuidad (en celdas) y distintas simplificaciones de la ecuación de cantidad de movimiento transformadas en formulaciones de descarga entre celdas (vinculaciones entre celdas). La distribución espacial de los parámetros y variables hidrológicas se realiza mediante la subdivisión de la cuenca en celdas de igual tamaño (cuadrangulares) interconectadas entre sí, que definen el dominio del sistema hídrico a modelar. Las celdas pueden ser tipo valle o río que representan el flujo superficial y en canal respectivamente. Las vinculaciones entre celdas pueden ser tipo río-río; tipo valle-río, tipo valle-valle; tipo terraplén, puente, alcantarilla,

compuerta y vertedero sin control. Para representar vinculaciones entre celdas de los cursos el modelo permite emplear diversos tipos de secciones simples. En esta aplicación se han definido secciones tipo trapezoidales (ancho de la base de fondo, cota de fondo, inclinación de taludes) equivalentes en capacidad de conducción a las secciones relevadas por Díaz Lozada et al. (2015) y relevadas en estudios antecedentes (FCEIA, 2011). Adicionalmente, en las celdas se deben definir coeficientes de resistencia al escurrimiento en el curso principal y en el valle de inundación. En las vinculaciones donde se definen puentes son requeridos la geometría y los coeficientes de gastos asociados ya que en este tipo de vinculaciones el modelo utiliza la ecuación de descarga de vertedero de cresta ancha con hasta tres escalones de diferentes niveles (o cotas) y anchos.

Descripción de la Cuenca

La cuenca del río Tercero-Caracaraña (Figura 1) se encuentra limitada entre los paralelos 31° 32' S y 34° 09' S y los meridianos 64° 58' O y 60° 44' O. Abarca a las provincias de Córdoba y Santa Fe (República Argentina).

Entre las localidades de mayor importancia se encuentran: Río Tercero; Río Cuarto; Villa María; Bell Ville; Laboulaye; Marcos Juárez; Cruz Alta y Corral de Bustos (Prov. de Córdoba) y Armstrong; Cañada de Gómez; Pueblo Andino; Caracaraña; Las Parejas y Puerto Gaboto (Prov. de Santa Fe).

Los cursos de agua de mayor importancia dentro de la provincia de Córdoba son el río Tercero (O Ctalamochita); río Cuarto (o Chocancarava) y río Saladillo; además existen numerosos arroyos; cañadas; bañados y lagunas. (A° Cabral; A° Carnerillo; A° de Tegua; A° Chato; Laguna La Salada; bañado del Saladillo; Cañada Santa Lucía).

El río Caracaraña nace en la confluencia de los ríos Tercero y Saladillo en la Pampa Norte cordobesa, siendo el Tercero el de mayor jerarquía cuantificado en función de su régimen de caudales.

En la provincia de Santa Fe ingresa el río Caracaraña a la altura de Cruz Alta y recibe los aportes de diferentes cursos de agua: A° Tortugas; A° Leones; Cda. de Gómez; entre otros. Finalmente el río Caracaraña desemboca en el riacho Coronda, brazo del río Paraná a la altura de Puerto Gaboto.

La red río Tercero-Caracaraña corresponde al curso de mayor jerarquía dentro de la cuenca.

La cuenca tiene su parte elevada (límite oeste) en la provincia de Córdoba en el límite con la provincia de San Luis en la sierra de Comechingones (cota máxima aproximada de 1938 m IGN) y una cota mínima en la desembocadura en el río Coronda de 11.3 m IGN. La cuenca de aportes superficiales tiene un área estimada de aproximadamente 57575 Km².

En la cuenca se presenta un régimen térmico templado. La isoterma media anual de los 16.5°C pasa dentro de la misma. Las isohietas en el área de estudio tienen cierta disposición N-S, con disminución de E a O, entre las de 1000 mm y 700 mm aproximadamente (FCEIA, 2011).

Los suelos son resultado de la sedimentación continua cuyos sedimentos superficiales son continentales y de procesamiento eólico, son muy ricos para la actividad agropecuaria (SSRHN, 2014).

Respecto al régimen de caudales, el río Tercero tiene caudales medios mensuales de aproximadamente de $27 \text{ m}^3/\text{seg}$. Al entrar en la llanura, el caudal disminuye considerablemente por infiltración, llegando a $17 \text{ m}^3/\text{seg}$ en Bell Ville y $72 \text{ m}^3/\text{seg}$ en Andino. La creciente ocurre en marzo con $111 \text{ m}^3/\text{seg}$, y la bajante en agosto con $46.1 \text{ m}^3/\text{seg}$ (Giacosa et al., 2000). En el río Carcaraña en la zona cercana a su desembocadura en el río Coronda se verifican caudales máximos superiores a $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ en crecidas extraordinarias. No obstante, la curva de duración de caudales medios diarios corresponde a un régimen de crecidas de corta duración y esporádicas, con caudales superiores a los $200 \text{ m}^3/\text{s}$ en no más del 5% de los días del año; también indica caudales superiores a $100 \text{ m}^3/\text{s}$ en no más del 20% de los días del año (FCEIA, 2011). Esta característica observada del régimen de caudales hace factible la simulación por eventos en la cuenca. En la información de caudales no se consideran los aportes regulados del aprovechamiento hidroeléctrico de Piedras Moras emplazado aguas arriba de Río Tercero.

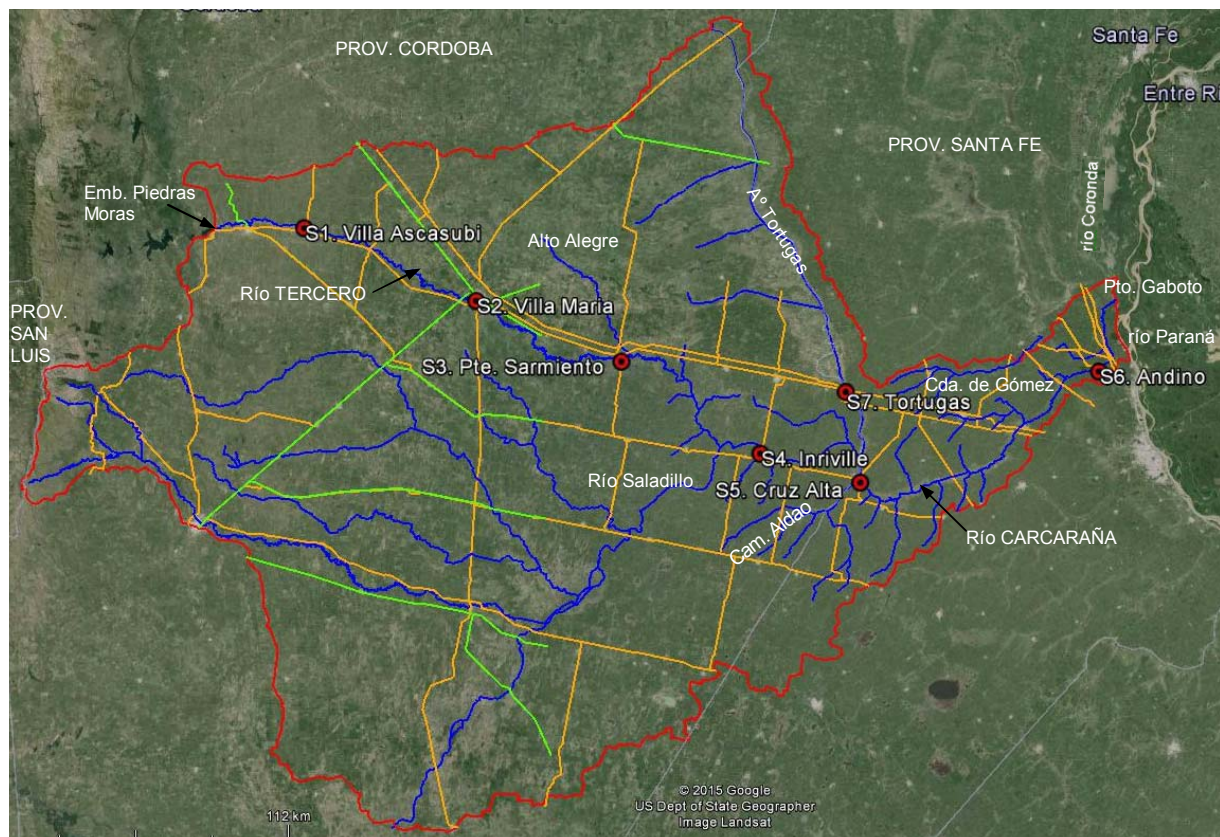


Figura 1.- Cuenca del río Carcaraña – Tercero. Imagen de fondo Google Earth ©.

Implementación del modelo matemático en la cuenca del río Tercero-Carcaraña

Los pasos realizados para la implementación del modelo matemático en la cuenca del río Tercero-Carcaraña fueron los siguientes:

i) Generación del modelo digital del terreno y límite de cuenca.

El modelo digital del terreno (MDT) se constituyó en base a la utilización de los datos correspondientes a la misión SRTM (Nasa, 2006) con cotas de terreno equiespaciadas cada 90 m. En función de la capacidad de información a ser manejada que permita operar computacionalmente al modelo matemático se adoptó un nivel de discretización espacial de celdas de $900 \text{ m} \times 900 \text{ m}$. Los datos originales del SRTM fueron procesados con un software específico que permitió recortar los datos dentro del límite de la cuenca; realizar la unificación de los mismos; realizar la proyección

plana a Gauss-Krüger (GK) - faja 4 Argentina Posgar 94, Datum WGS 84 y finalmente realizar el agrupamiento en valores equidistantes de 900 m x 900 m. Para la delimitación de la cuenca se utilizaron las curvas de nivel obtenidas del MDT agregado de 900 m x 900 m y se realizó el trazado considerando la divisoria de aguas topográfica. Se complementó el trazado utilizando las herramientas específicas del software ILWIS (2005) tales como la determinación de las direcciones de escurrimiento, la determinación de la red de drenaje, la determinación de las áreas de aportes correspondiente y finalmente la delimitación de la cuenca completa. Estas operaciones se utilizaron para complementar; corroborar o modificar la divisoria de aguas obtenida mediante el trazado sobre las curvas de nivel. Se consideró como sección de control de la cuenca la desembocadura del río Carcaraña en el río Coronda a la altura de Puerto Gaboto. Para el curso del Río Tercero se consideró como límite de la cuenca aguas arriba la última salida aguas abajo de la red de embalses del Río Tercero; que corresponde al embalse Piedras Moras. El modelo permite en esta sección ingresar el hidrograma de salida del embalse en caso de ser necesario..

ii) Modelación del trazado vial y ferroviario

Para la definición de la traza de los terraplenes carreteros y ferroviarios de mayor importancia se contó con información disponible (FCEIA; 2011); cartas topográficas digitalizadas del IGN y estudios previos. Se definió la traza de los terraplenes en el software Google Earth y desde allí se exportaron y se realizó el tratamiento correspondiente para obtener la red de terraplenes georreferenciada en formato DXF; luego se importaron en la plataforma visual del VMMHH 1.0 y se definieron las vinculaciones que corresponden a los terraplenes y sus características en el modelo matemático. Dichas características son: cota de coronamiento y coeficiente de descarga. Este último representa al terraplén funcionando como vertedero en una situación de desborde. Se definieron un total de 4519 vinculaciones tipo terraplén, generando una extensión de 4067 Km.

iii) Modelación de la red hídrica y puentes

Para la incorporación de la red de cursos se utilizaron diferentes fuentes de información con la finalidad de obtener tanto la definición de la traza como las características hidráulicas y geométricas más representativas de los diferentes tramos de los cursos. Dichas fuentes fueron: Google Earth ©; relevamientos y estudios previos existentes (FCEIA, 2011). Se realizó el trazado de los cursos en el software Google Earth © y desde allí se exportaron y se realizó el tratamiento correspondiente para obtener la red de cursos georreferenciada en formato DXF; luego se importaron en la plataforma visual del VMMHH 1.0 definiéndose luego las celdas ríos y sus características en la constitución del modelo matemático.

Cada celda río posee las siguientes características: ancho de la base de fondo, talud, profundidad, coeficiente de rugosidad de Manning en río y en valle y cota de fondo. Estas características debieron ser ingresadas al modelo para cada celda. Se cargaron un total de 3618 elementos río, generando una extensión de 3256 Km de cursos.

Adicionalmente se identificaron las obras de cruce de mayor importancia sobre el trazado vial definido. Se identificaron alcantarillas y puentes en el Google Earth ® y se ingresaron en el modelo matemático. Se definieron las siguientes características: ancho, coeficiente de descarga, cota de fondo y altura. Previendo la situación de desborde del terraplén, se definió la cota del coronamiento del mismo (coincidente con la cota de calzada del terraplén carretero o la cota de riel en los terraplenes ferroviarios) y el coeficiente de descarga correspondiente. Se ingresaron un total de 101 puentes y alcantarillas.

iv) Condiciones de borde e iniciales

Para la corrida del modelo se definieron las siguientes condiciones de borde, iniciales y entradas al modelo: a) Alturas de agua en todas las celdas del modelo: se obtuvo a partir de considerar la situación de caudal en los cursos principales al inicio del evento de lluvia; b) Lluvia neta en cada celda obtenida en base a los registros de lluvias totales registrados por las estaciones pluviográficas; condiciones de humedad antecedentes y características del tipo y cobertura del suelo. Se utilizó el método de Green y Ampt para computar las pérdidas; c) Condiciones de borde aguas abajo: asociada a la cota del Río Paraná en la fecha del evento de lluvia a modelar.

El modelo se constituyó con un tamaño de grilla (TG) cuadrangular de 900 m de lado (Figura 2), conformado por 71080 celdas (67462 celdas tipo valle y 3618 celdas tipo río) y 141078 vinculaciones entre celdas (3518 entre celdas río, 126142 entre celdas valle, 6798 entre celdas valle río, 101 puentes y alcantarillas y 4519 terraplenes).

Proposición y ajuste de parámetros del modelo en las secciones estudiadas

A partir del trabajo antecedente de Stenta et al. (2014), se avanzó en esta instancia en el análisis de las relaciones altura-caudal determinadas en la simulación de un evento histórico, en diferentes secciones de cursos de importancia dentro de la cuenca para su comparación con las relaciones altura-caudal aforadas (Díaz Lozada et al., 2015).

Las secciones analizadas son (Tabla 1; Figura 1 y Figura 2): Puente de ingreso a Villa Ascasubi (curso Río Tercero – S1), Puente Alberdi (Villa María - curso Río Tercero – S2), Puente Sarmiento (Bell Ville - curso Río Tercero – S3), Inrville (curso Río Carcaraña – S4), Cruz Alta (curso Río Carcaraña – S5), Pueblo Andino (curso Río Carcaraña – S6) y Puente R9 (Arroyo Tortugas – S7).

Las características de las secciones medias ingresadas en el modelo y utilizadas para la comparación de las curvas altura-caudal se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1.- Características medias de las secciones analizadas.

Sección	Curso	Ubicación	Ancho de la base de fondo (m)	Profundidad del curso (m)	Talud 1H: xV	Pendiente media del tramo (‰)
S1	Río Tercero	Villa Ascasubi	30	3	1	1.25
S2	Río Tercero	Villa María	30	3	1	1.20
S3	Río Tercero	Bell Ville	35	4	1	0.70
S4	Río Carcaraña	Inrville	42	5	1	0.28
S5	Río Carcaraña	Cruz Alta	42	6	1	0.38
S6	Río Carcaraña	Pueblo Andino	47	7	1	0.30
S7	A° Tortugas	Puente R9	12	2.2	1	0.27

En el proceso de ajuste de parámetros comparando las curvas altura-caudal aforadas (Díaz Lozada et al., 2015) y modeladas se avanzó en la determinación del rango de valores de los coeficientes de resistencia al escurrimiento del curso, del valle de inundación aledaño a los cursos principales y coeficientes de gasto en puentes y alcantarillas. Para obtener los resultados de los diferentes niveles y caudales en las secciones analizadas se utilizó un evento extraordinario observado ocurrido en diciembre de 2013. Este evento, conjuntamente con las condiciones de borde e iniciales para el modelado se describen en Stenta et al. (2014).

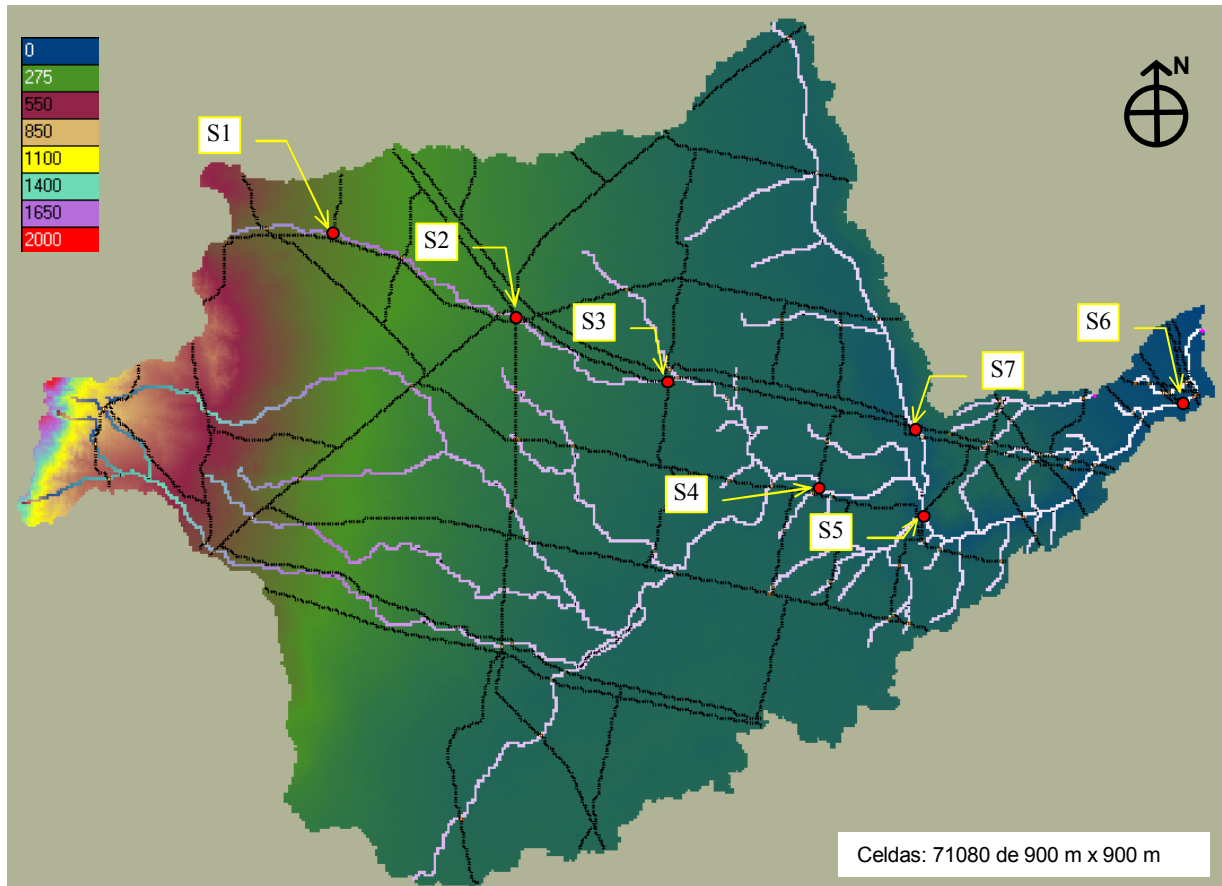


Figura 2.- MDT; constitución del modelo matemático y secciones estudiadas. Cuenca del río Tercero-Carcaraña.

Los parámetros utilizados para cuantificar la calidad del ajuste de las curvas altura-caudal aforadas y modeladas son: coeficiente de correlación R^2 (ecuación 1), el error absoluto medio normalizado (NMAE; ecuación 2) y el error porcentual del sesgo (PBIAS, ecuación 3). A los fines de definir un entorno de resultados aceptables se consideran los siguientes valores como resultados satisfactorios: $R^2 > 0.7$; $NMAE < 20\%$; $PBIAS < 20\%$.

$$R^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^N (x_{i\text{obs}} - \bar{x}_{\text{obs}})(x_{i\text{mod}} - \bar{x}_{\text{mod}}) \right)^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_{i\text{obs}} - \bar{x}_{\text{obs}})^2 \sum_{i=1}^N (x_{i\text{mod}} - \bar{x}_{\text{mod}})^2}} \quad (1)$$

$$NMAE = \left(\frac{\sum_{i=1}^N \frac{|x_{i\text{mod}} - x_{i\text{obs}}|}{x_{i\text{obs}}}}{N} \right) \times 100 \quad (2)$$

$$PBIAS = \left(\frac{1}{\bar{x}_{\text{obs}}} \sum_{i=1}^N \frac{(x_{i\text{mod}} - x_{i\text{obs}})}{N} \right) \times 100 \quad (3)$$

Donde $x_{i\text{obs}}$ es el valor del caudal aforado (m^3/s) para la altura h_i ; \bar{x}_{obs} es el promedio de los caudales aforados (m^3/s); $x_{i\text{mod}}$ es el valor del caudal modelado (m^3/s) para la altura h_i ; \bar{x}_{mod} es el promedio de los caudales modelados (m^3/s); N es el numero de puntos en que se subdividió la curva H-Q.

Se realizó un proceso manual e iterativo en cada tramo del curso en cercanías de la sección en estudio a los fines de alcanzar el mejor ajuste de las curvas altura-caudal aforadas y simuladas dentro del entorno aceptable de los coeficientes (resistencia al escurrimiento del curso, del valle de inundación aledaño a los cursos principales y coeficientes de gasto en puentes y alcantarillas) utilizados en el ajuste.

Posteriormente, a partir de los resultados y constitución original, se realizó un estudio de sensibilidad en las curvas H-Q estudiadas donde se modificaron los valores del ancho de la base de fondo y el coeficiente de rugosidad del curso principal en $\pm 20\%$. Esta modificación se realizó por tramo del curso donde se encuentra cada sección transversal estudiada. Se realizaron por lo tanto 4 simulaciones adicionales, partiendo de la constitución original y se modificó el ancho de la base de fondo en $+20\%$ (BF+20%) y en -20% (BF-20%); lo mismo respecto al coeficiente de rugosidad de Manning del curso principal de $+20\%$ (nr+20%) y -20% (nr-20%).

EVALUACIÓN DE RESULTADOS

A partir de los resultados de la modelación se obtuvieron las curvas altura-caudal en las secciones definidas y se realizó la comparación con las curvas altura-caudal aforadas.

En la Figura 3 se muestran ambas curvas en las 7 secciones analizadas. Se muestran las curvas obtenidas mediante el modelo (MODELO – Figura 3) y las curvas aforadas presentadas en el trabajo Díaz Lozada et al. (2015) (AFORO – Figura 3).

En la Tabla 2 se resumen los valores alcanzados de los parámetros R2, NMAE y PBIAS para dichas secciones analizadas.

Los valores de los parámetros obtenidos para el ajuste de las curvas altura caudal fueron:

- coeficiente de resistencia del curso: $n_r = 0.025 - 0.040$;
- coeficiente de resistencia en el valle de inundación aledaño a la sección de escurrimiento principal: $n_v = 0.10 - 0.12$.
- coeficiente de gasto en la vinculación tipo puente: $C_d = 0.7 - 0.9$.

Los valores ajustados de los coeficientes se encuentran dentro de los límites aceptables y los resultados obtenidos en términos de ajuste de las curvas se consideran satisfactorios en términos generales.

En función de los límites adoptados de los parámetros utilizados para la cuantificación del ajuste entre curvas se observa que:

- respecto al coeficiente R2 los resultados son muy buenos (valores superiores a 0.95)
- respecto al parámetro NMAE se observan resultados aceptables (valores inferiores al 20 %) salvo para las secciones Río Tercero – Bell Ville (Puente Sarmiento; sección S3; NMAE=22.22 %) y Río Tercero - Villa Ascasubi (sección S1, NMAE = 26.04 %).
- respecto a los valores de PBIAS todos los resultados son menores al 13 % considerándose los resultados satisfactorios.

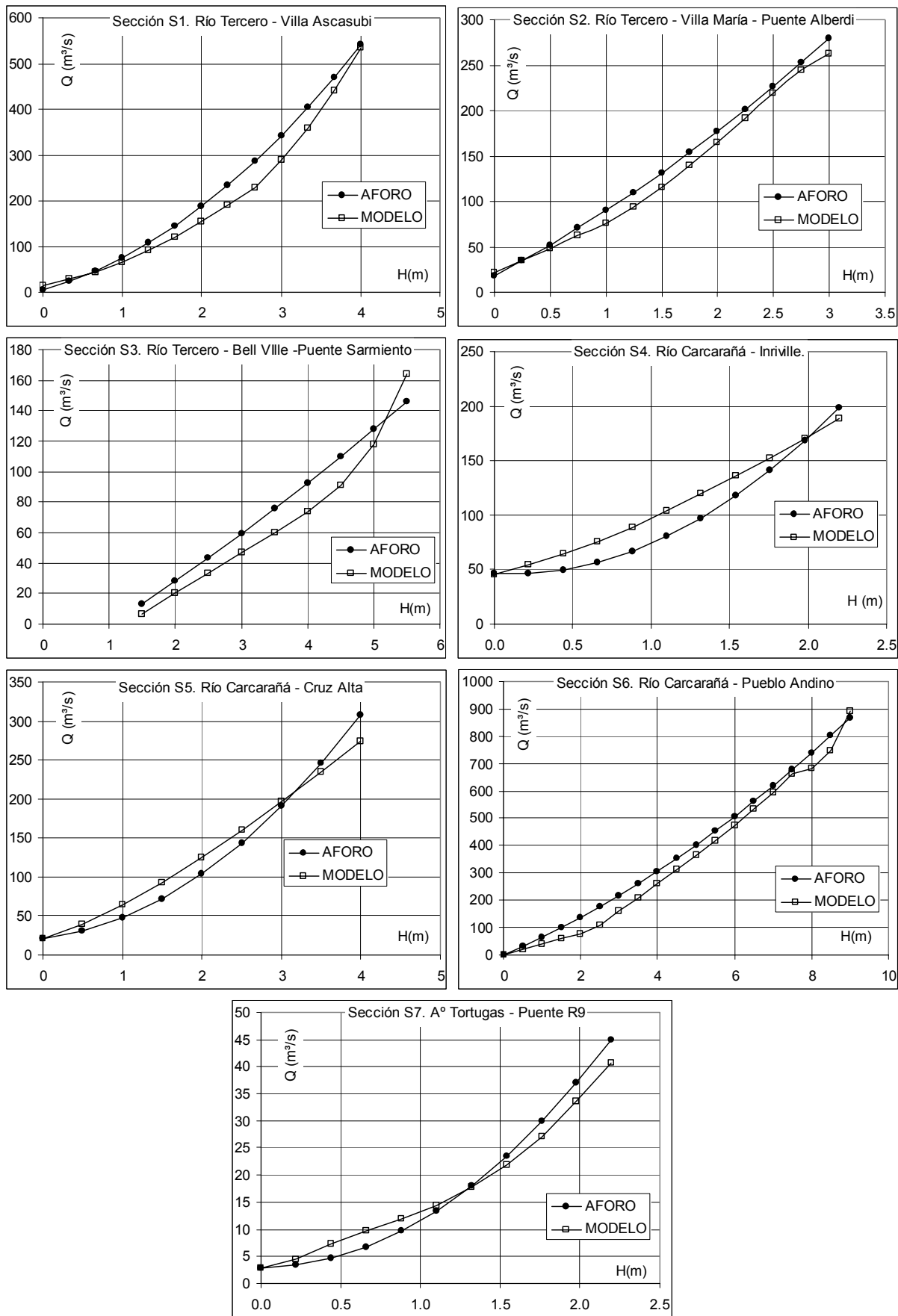


Figura 3.- Curvas aforadas y modeladas. Secciones S1 a S7.

Tabla 2.- Secciones analizadas para comparación de curvas altura-caudal aforadas (Díaz Lozada et al., 2015) y modeladas.

Sección	Curso	Ubicación	R2	NMAE (%)	PBIAS (%)
S1	Río Tercero	Villa Ascasubi	0.987	26.04	-10.74
S2	Río Tercero	Villa María	0.996	8.49	-6.98
S3	Río Tercero	Bell Ville	0.956	22.22	-11.67
S4	Río Carcarañá	Inriville	0.960	18.17	12.15
S5	Río Carcarañá	Cruz Alta	0.982	16.49	4.01
S6	Río Carcarañá	Pueblo Andino	0.994	16.93	-8.95
S7	A° Tortugas	Puente R9	0.992	19.26	-1.38

Una primer causa de las diferencias observadas entre las curvas observadas y modeladas se le atribuye al nivel de abstracción utilizado en la implementación del modelo matemático en la cuenca. Esto puede ser presentado como una limitación en lo que se refiere a la escala de agregación (tramos de cursos de 900 m). Se evidencian diferencias que responden a que las características morfológicas (variabilidad de profundidades, pendiente de fondo, formas de la sección transversal del curso y del valle de inundación, etc) son agregadas mediante un valor medio representativo de las características del tramo cada 900 m. Es posible afirmar que debido al nivel de discretización adoptado del modelo pueden ser justificadas parcialmente las diferencias entre las curvas aforadas y curvas modeladas. Se remarca que esta situación de agregación del modelo actúa como limitación en la representación del proceso hidráulico de tránsito dentro del tramo en los cursos analizados.

Una segunda causa que se identifica como fuente de diferencias en el contraste de curvas altura-caudal tiene que ver con las alteraciones del flujo debido a particularidades locales dentro del tramo que no pueden ser ingresadas o definidas explícitamente en el modelo con el nivel de detalle necesario, como por ejemplo, terraplenes de caminos o rutas secundarias o menores, construcciones en las márgenes del cursos (edificaciones, desarrollos urbanos, balnearios, etc).

Una tercer fuente de error tiene que ver con que los resultados obtenidos en el modelo debido a que la pendiente media del tramo de los cursos ingresados se obtuvo a partir del MDT del SRTM y de cartas topográficas. Como se indicara, la forma de mejorar los resultados es obtener datos a partir de relevamientos topográficos de detalle las secciones del curso y accidentes naturales o artificiales cada 900 m para poder incorporar dichas características en el modelo implementado.

Otro fuente de error para los casos en que el flujo está desbordado tiene que ver con la representación de las características geométricas y altimétricas del valle de inundación. Nuevamente se indica que en el modelo se tiene, para las celdas del valle aledañas al curso principal un valor medio representativo de cota del terreno natural cada 900 m lo que define el valle de inundación aledaño. En las secciones que se observan desbordes (por ejemplo para el evento simulado las secciones S1, S3, y S6 se encuentran desbordadas) se debe considerar la integración del caudal en todo el ancho inundado. Esta situación puede originar diferencias entre las curvas debido, nuevamente, al nivel de agregación en el modelo que define en este caso el valle de inundación.

A partir de la identificación de las probables fuentes de error y en función de que el objetivo principal del trabajo es reproducir curvas altura caudal en diferentes secciones en la red

principal de escurrimiento, se evidencia la necesidad de mejorar el nivel de detalle en la implementación del modelo. No obstante, se verifica que no se produce una mejora sustancial respecto a la aplicación original del modelo realizada por Stenta et al. (2014) orientada a la reproducción de procesos de transformación lluvia-caudal y tránsito en toda la cuenca llevada a cabo para un grupo de crecidas históricas. Es decir, el actual nivel de detalle para la aplicación original resulta adecuado para la reproducción de crecidas históricas pero para el mejoramiento de la descripción hidráulica a escala de tramo de río requiere ser mejorada si se desea disminuir las diferencias observadas en las comparaciones de las relaciones altura-caudal.

Respecto al análisis de sensibilidad (Figura 4), los resultados obtenidos son en general satisfactorios. Considerando todas las secciones (7 secciones) se estimó que dentro de la envolvente que se obtiene al considerar las modificaciones de $\pm 20\%$ de BF y $\pm 20\%$ de nr se observa que el 76 % de los valores observados (H-Q Aforo) se encuentran dentro de dicha envolvente (Envolvente Superior y Envolvente Inferior en Figura 4). Se tomaron valores de caudales mayores o iguales al 20 % del caudal máximo para realizar dicha cuantificación, con el objetivo de priorizar la reproducción de caudales medios y altos, ya que los mismos resultan en general de interés en toda aplicación o utilización del modelo.

En forma particular para la Sección 1 se observa que los puntos aforados se encuentran dentro de la envolvente para caudales superiores a los 400 m³/s; en la Sección 2 todos los puntos aforados se encuentran dentro de la envolvente; en la Sección 3 se observa que se reproducen caudales aforados para valores inferiores a 50 m³/s y superiores a 100 m³/s, la Sección 4 los caudales muy pequeños y los caudales mayores a 100 m³/s se encuentran dentro de la envolvente; para la Sección 5 la mayoría de los caudales aforados se encuentran dentro de la curva envolvente (valores de caudales cercanos a los 50 m³/s quedan fuera de la envolvente); para la Sección 6 para caudales aforados superiores a los 300 m³/s la modelación reproduce dichos caudales a partir de la envolvente y finalmente para la Sección 7 se reproducen caudales similares a los aforados para valores superiores a los 10 m³/s.

CONCLUSIONES

A partir de los trabajos realizados por Díaz Lozada et al. (2015), donde se obtuvieron curvas altura-caudal aforadas en diferentes secciones de cursos pertenecientes a la cuenca del río Tercero-Carcarañá, se realizó en este trabajo la cuantificación del grado de ajuste obtenido al comparar dichas curvas respecto a curvas altura-caudal determinadas en la modelación matemática de un evento histórico. Se utilizó un modelo hidrológico-hidráulico físicamente basado cuasi 2D con tamaño de grilla 900 m x 900m en la cuenca del río Tercero-Carcarañá implementado en trabajos antecedentes (Stenta et al., 2014). Se realizó el análisis en 7 secciones, 3 correspondiente al río Terceo; 3 correspondiente al río Carcarañá y 1 correspondiente al A° Tortugas.

Los parámetros del modelo matemático obtenidos (coeficiente de resistencia del curso; del valle y coeficiente de gasto en puentes) se encuentran dentro del rango de valores comúnmente aceptados en la bibliografía.

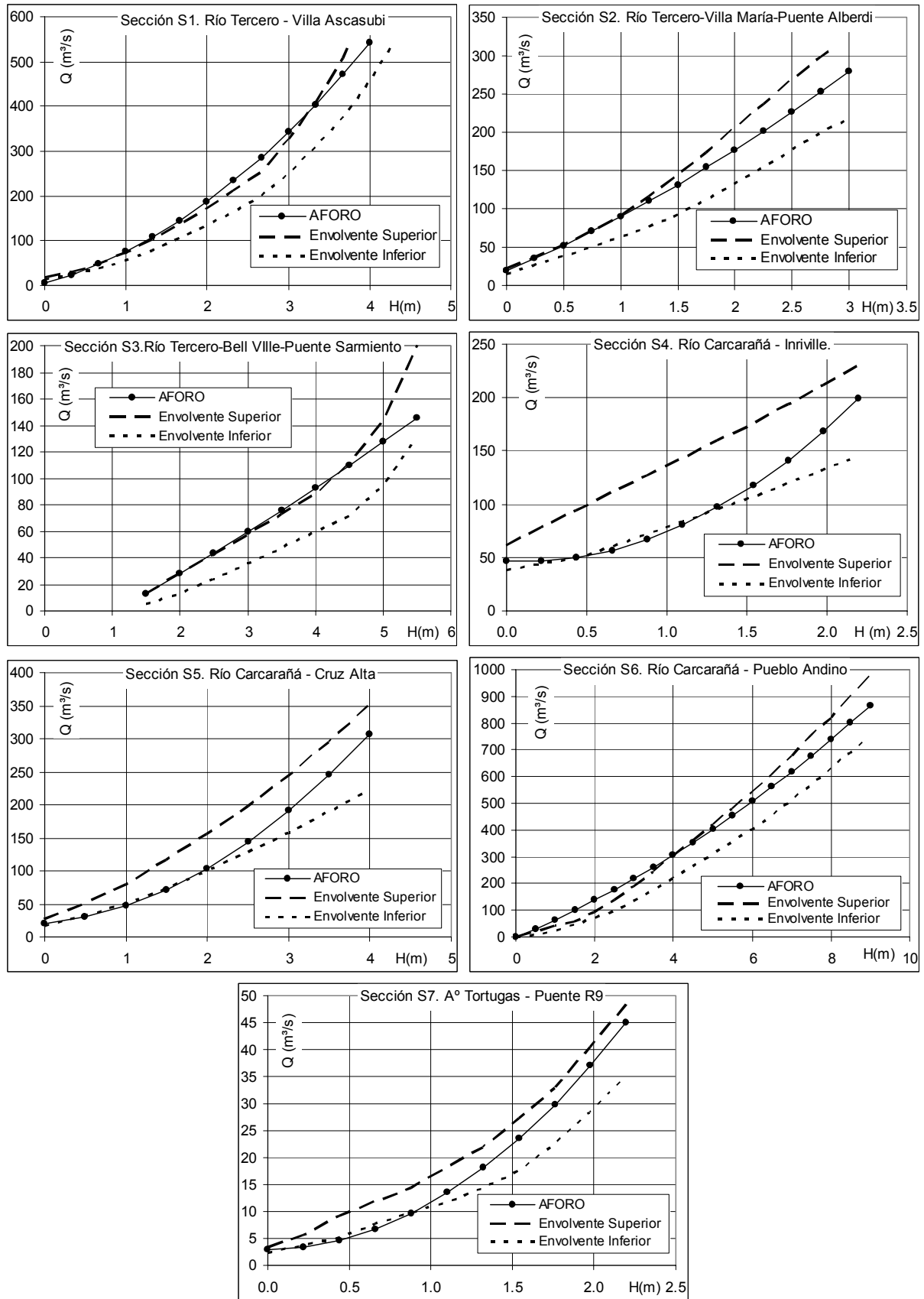


Figura 4.- Sensibilidad y curva envolvente para $\pm 20\%$ BF y $n_r \pm 20\%$. Secciones S1 a S7.

Los resultados obtenidos son satisfactorios en términos de coeficiente de correlación R2 (valores mayores a 0.95) y PBIAS (valores menores a 13 %). En términos de NMAE los resultados son aceptables obteniéndose en 5 secciones valores inferiores al 20% y en dos secciones valores superiores a 20 %.

Los resultados de análisis de sensibilidad en la reproducción de los datos aforados indican que se obtienen resultados satisfactorios en términos generales asumiendo una modificación de la base de fondo y del coeficiente de rugosidad del curso principal en ± 20 %. Los resultados indican que se reproduce por lo menos el 76 % de los valores aforados en las 7 secciones estudiadas.

En el actual estado de avance de los trabajos puede concluirse que los resultados alcanzan el estatus de aceptables. Un mejoramiento en la descripción hidráulica a nivel de tramo de río podrá ser logrado a partir de un mayor nivel de detalle, lo cual repercutirá en una mayor certeza de las variaciones de la geometría de las secciones transversales, las cotas representativas de fondo, de desborde, pendiente media de cada tramo y valle de inundación. Para dicho nivel de detalle se deberá contar con relevamientos topográficos de detalle que a la fecha no se disponen. Sintetizando puede afirmarse que con el nivel de detalle actual y el grado de abstracción asumido en la geometría de las secciones de conducción de flujo se logra una satisfactoria reproducción de la dinámica de la cuenca (Stenta et al., 2014) pero debe ser mejorada si se requiere definir variables hidráulicas a nivel de tramo de curso principal y disminuir las diferencias entre curvas observadas y calculadas por el modelo.

Se resalta la importancia de los trabajos referidos a aforos de niveles y caudales para poder dar un salto de calidad en el ajuste de parámetros de modelos matemáticos que a su vez permiten realizar una mejor explotación de los mismos en diferentes usos como pronóstico de niveles, zonificación de áreas inundables, impactos en los cursos debido a la presencia de estructuras hidráulicas, obras viales y ferroviarias.

Agradecimientos. A la UNR por el apoyo brindado en el marco de los PID 19-1368 y 19-1358

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barchiesi, G., Díaz Lozada, J.M., Caminal, F., Herrero, H., García, M., Cossavella, A., Castello, E., Romagnoli, M., Portapila, M. (2013). “Cuantificación y Caracterización del Esguerrimiento en la Cuenca del río Carcarañá”. *Sexto Simposio Regional Sobre Hidráulica de Ríos*, Santa Fe, Argentina.

Basile, P., Riccardi, G., Zimmermann, E., Stenta, H., Bussi, P., Mangiameli, P. (2013). “Aprovechamiento del río Carcarañá-Tercero como vía fluvial navegable. Parte I: Diseño del sistema de transporte y de la vía fluvial”. *Revista Cuadernos del CURIHAM*, vol 19, año 2013. pp. 51-69.

Cunge, J. (1975). “Two Dimensional Modelling of Flood plañis”. Cap. 17 *Unsteady flow in open channels* (Ed. Mahmood K. and Yevjevich V.) Water Resources Publications, Fort Collins.

Díaz Lozada, J. M.; García, C. M.; Herrero, H.; Barchiesi, G.; Romagnoli, M.;

Portapila, M.; Lopez, F.; Castelló, E.; Cosavella, A. y Brarda, J. P. (2015). “Cuantificación del escurrimiento superficial de la cuenca del Río Carcarañá”, *Revista Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, FCEFyN, UNC, Vol. 2, No. 1, pp. 59-72.

FCEIA (Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura – Univ. Nac. de Rosario, Santa Fe, Argentina) (2011). “Estudio de Prefactibilidad para el Aprovechamiento del río Carcarañá como Ruta Fluvial Navegable”. Informe de Avance N° 1 y 2. Rosario, Septiembre 2011.

Giacosa, R., Paoli, C. y Cacik, P. (2000). “Conocimiento del regimen hidrológico”. Cap. 2. En: *El río Paraná en su tramo medio*. Paoli, C. y Schreider, M (eds). Tomo 1. ISBN Tomo 1. pp. 69-104. 987-508-121-3. Centro de Publicaciones Universidad Nacional del Litoral.

ILWIS (2005). Integrated Land and Water Information System. ILWIS 3.3 Academic. Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation of the University of Twente.

NASA (2006). Shuttle Radar Topography Mission. <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

Paoli, C., Iriondo, M. y García, N. (2000). “Características de las cuencas de aporte”. Cap. 1. *El río Paraná en su tramo medio*. Paoli, C. y Schreider, M. (eds). Tomo 1. ISBN Tomo 1. 987-508-121-3. Centro de Publicaciones Universidad Nacional del Litoral.

Riccardi, G., Basile, P., Zimmermann, E., Stenta, H., Bussi, P., Mangiameli, P., Pesci, M. (2013a.) “Diseño de presas de navegación en el estudio de prefactibilidad para el aprovechamiento del río Carcarañá como vía fluvial navegable”. *Sexto Simposio Regional Sobre Hidráulica de Ríos*, Santa Fe, Argentina.

Riccardi, G., Basile, P., Zimmermann, E., Stenta, H., Bussi, P., Mangiameli, P., Pesci, M., (2013b.). “Aprovechamiento del río Carcarañá-Tercero como vía fluvial navegable. Parte II: Diseño hidráulico de presas de navegación”. *Revista Cuadernos del CURIHAM*, vol 19, año 2013. pp. 71-85.

Riccardi, G., Stenta, H., Scuderi, C., Basile, P., Zimmermann, E., Trivisonno, F. (2013c). “Aplicación de un modelo hidrológico-hidráulico para el pronóstico de niveles de agua en tiempo real”, *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. IV, núm. 1, pp. 83-105.

SSRHN (2014). Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, http://www.hidricosargentina.gov.ar/documentos/referencias_i8/31.pdf (acceso 15/04/2014). Elaborado por Santiago Javier Martínez. 10 pag.

Stenta, H.; Riccardi, G.; Basile, P. y Trivisonno, F. (2014). “Implementación de un modelo matemático distribuido de escurrimiento superficial en la cuenca del río Tercero – Carcarañá”. *Memorias del II Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras* (Venturini V. et al. Eds.), Santa Fe. Univ. Nac. del Litoral.

Venencio, M. del V. (2007). *La Recarga Natural Al Acuífero Libre Y Su Vinculación Con La Variabilidad Climática Regional*. Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional De Córdoba. 211 pags.