

IMPLEMENTACIÓN DEL MAPA DIGITAL DE ELEVACIÓN MDE-AR Y UN MDT PARA LA SIMULACIÓN DEL ESCURRIMIENTO EN PLANICIE DE INUNDACIÓN. CASO SALADO (SANTA FE) CRECIDA DE 2003.

IMPLEMENTATION OF THE DIGITAL ELEVATION MAP MDE-AR AND AN MDT FOR THE RUNOFF SIMULATION IN THE FLOODPLAINS. CASE: FLOOD 2003, SALADO RIVER (SANTA FE).

Matías Imhoff^a, Lucas E. Palman^a, Ana M. T. Alvarez^a, y Alfredo E. Trento^a

^a*Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, CC 217, (3000)
Santa Fe, Argentina. mati_imhoff@hotmail.com*

Palabras Clave: MDE, rugosidad, crecida 2003, bidimensional.

Resumen. El avance en la adquisición de información topográfica ha permitido la implementación de Modelos Digitales de Elevación (MDE), para simular escurrimientos en planicies de inundación. Aplicar modelos 2DH en ríos de llanura permite analizar la importancia de las planicies durante las crecidas, donde solo un porcentaje del caudal escurre por el cauce principal. Se implementó el sistema computacional SisBaHiA (Sistema Base de Hidrodinámica Ambiental) en el tramo del río Salado (Santa Fe, Argentina) entre el A° Cululú y la ruta 70 para la crecida extraordinaria de 2003. Se compararon resultados para dos configuraciones de batimetría de la planicie, una determinada a partir del MDE-Ar (IGN) y otra con un Modelo Digital del Terreno (MDT) elaborado con perfiles transversales de campo. La rugosidad superficial se calculó a partir de trabajos de campo. Los resultados se contrastaron con información medida al momento del pico. Los mismos muestran que la planicie transportó más del 70 % del caudal pico.

Keywords: MDE, roughness, 2003 flood, two-dimensional.

Abstract. The advance in the acquisition of topographic information has allowed the implementation of Digital Elevation Models (MDE), to simulate runoff in floodplains. Applying 2DH models in plain rivers allow to analyze the importance of floodplains during floods, where only a percentage of the water flows down the main channel. The computer system SisBaHiA (Base System of Environmental Hydrodynamics) was implemented in the stretch of the Salado River (Santa Fe, Argentina) between the Cululú creek and the 70 route, for the extraordinary flood of 2003. The results were compared for two configurations of bathymetry of the plain, one determined from the MDE-Ar (IGN) and another with a Digital Terrain Model (MDT) made with field transversal profiles. The surface roughness was calculated from field works. The results were contrasted with information measured for the time of the peak flow. They show that more than 70% of the peak flow was transported through the plain.

1 INTRODUCCIÓN

Las pérdidas ocasionadas por inundaciones constituyen un serio problema tanto en nuestro país como en el resto del mundo, por lo tanto su análisis y prevención es un factor clave para las autoridades y organismos relacionados a los recursos hídricos. Distintos estudios (Paoli, 2015; García 2010) indican que ha existido en los últimos años un aumento de eventos de inundación por sobre otras catástrofes naturales en todo el mundo. Es por esto que existe un creciente interés en la modelación de crecidas de ríos debido a la necesidad de analizar estos fenómenos naturales.

Los modelos numéricos unidimensionales (1D) utilizados usualmente, presentan limitantes en determinados escenarios, como ser los sistemas cauce-planicie en ríos de llanura donde el valle aluvial presenta una morfología compleja, frecuentemente surcado por una densa red de cursos secundarios, con presencia de abundante vegetación y con albardones costeros. En estos casos, para simulaciones numéricas a gran escala espacial y temporal, los modelos 1D resultan inapropiados ya que la unidimensionalidad no es representativa del patrón de flujo real. Es así que, para determinar con precisión el campo de velocidades y las alturas del nivel del agua se justifica el interés en la aplicación de modelos bidimensionales integrados en la vertical (2DH) o tridimensionales (3D). Con el desarrollo de nuevas tecnologías existen en la actualidad una gran variedad de modelos 2DH para la simulación de inundaciones, que requieren como información fundamental la topografía del terreno a simular, la que puede ser obtenida a partir de Modelos Digitales de Elevación (MDE) disponibles de manera gratuita.

Horritt y Bates (2001) realizaron un estudio sobre el efecto en el cambio de la resolución espacial de los DEM. Los mejores resultados se obtuvieron con una resolución de 100 m, después de la cual no se observó mejoría significativa con el aumento de la resolución. Adicionalmente se concluyó que las predicciones en cuanto a los niveles de agua fueron aceptables hasta una resolución de 500 m. El trabajo realizado por Horritt y Bates en 2001, sólo contempló el cambio en la resolución espacial y no la fuente de obtención de los datos, como sí lo hicieron estudios posteriores. Tal es el caso de Sanders (2007), quien concluyó que con la cartografía LIDAR los resultados de las simulaciones representaban mejor los datos observados debido a su precisión vertical y horizontal.

Al igual que Sanders (2007), Cook y Merwade (2009) realizaron un análisis comparativo entre los resultados del cálculo de inundaciones determinados a partir de diferentes MDE. Concluyeron que los mejores resultados se obtuvieron a partir de los MDE obtenidos con cartografía LIDAR de baja resolución, y que la precisión mejora aún más si se introducen datos de batimetría fluvial.

En zonas como la llanura Pampeana Argentina, la aplicación de modelos para simular crecidas presenta dificultades que generan cierta incertidumbre en la obtención de resultados. La más importante radica en la correcta representación de la topografía, ya que el poco desnivel de este tipo de regiones ocasiona que las pequeñas alteraciones en el terreno, como es el caso de la vegetación o los terraplenes de caminos, se comporten como grandes obstáculos. En la mayoría de los trabajos realizados la topografía ha sido generada a partir de cartografía del Instituto Geográfico Nacional (IGN), que en su mayoría está disponible en una escala de 1:50.000 y con equidistancia entre curvas de nivel de 2.5m.

Euillades et al. (2002) realizaron un estudio sobre una región de llanura de 10.000 km² en la provincia de Buenos Aires, Argentina, con dos MDE diferentes. Uno construido a partir de cartografía con escala 1:50.000 y otro generado a partir de interferometría sobre pares de

imágenes radar tomadas de satélite. Determinaron que si bien a gran escala el aspecto de ambas topografías es similar, el modelo generado por interferometría consigue capturar mayores detalles, y demostraron que los mismos cumplen un rol importante en el escurrimiento superficial. En el mismo sentido, De Gonzalo (2011) analizó la influencia de la calidad y resolución de la geometría de entrada en la obtención de áreas de inundación mediante la utilización de los modelos hidrodinámicos HEC-RAS 3.1.1 (USACE, 2000) e IBER 2D v1.06, obteniendo que el efecto de la resolución de los DEM puede llevar a producir resultados con un nivel considerable de error, convirtiendo a la topografía en el factor más determinante en la modelación hidrodinámica 2D de inundaciones.

Otro factor importante a tener en cuenta en la simulación de crecidas en ríos de llanura es la determinación de la rugosidad superficial, sobre todo en aquellos casos donde las planicies poseen abundante vegetación de diferentes alturas y densidad, que para situaciones de desborde se convierten en elementos importantes para evaluar la distribución de caudales. La asignación del parámetro de resistencia al flujo para cada celda computacional de los modelos matemáticos requiere de un particular estudio. Para tal fin, el análisis complementario de datos de teledetección ha demostrado un gran potencial para proporcionar las mediciones cuantitativas de rugosidad en los entornos fluviales.

El presente trabajo se centró en la simulación hidrodinámica bidimensional con el sistema computacional SisBaHiA (Rosman, 2008) de la crecida del año 2003 en un tramo del río Salado, en la provincia de Santa Fe, comprendido entre la Ruta Provincial N° 70 (RP 70) y la confluencia del Salado con el Arroyo Cululú (ver Figura 1).

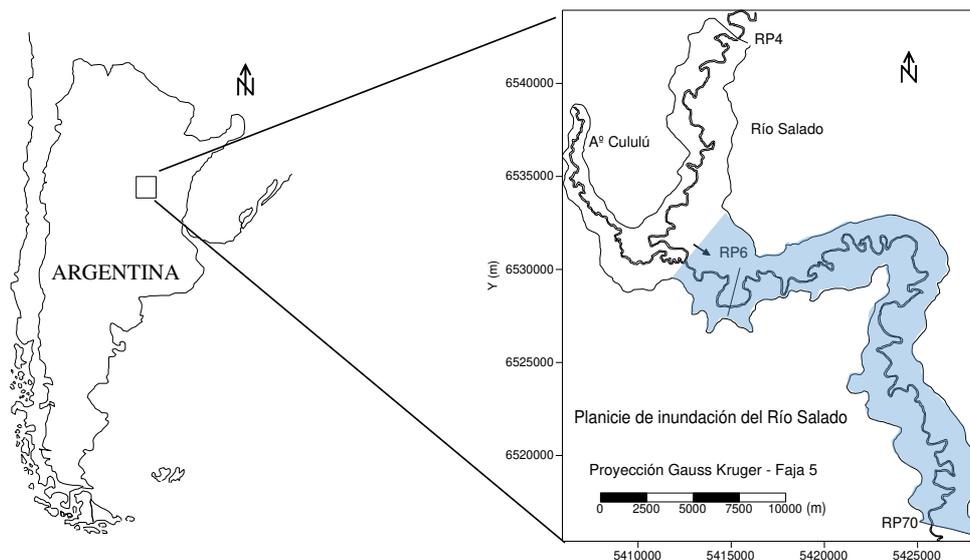


Figura 1.- Ubicación del área de estudio. A la derecha, cauces principales del río Salado, del arroyo Cululú y planicie de inundación.

La elección de SisBaHiA se basó en la versatilidad de su grilla de elementos finitos para representar una geometría compleja con dos escalas espaciales (cauce-planicie) muy distintas, en la disponibilidad de submodelos de transporte para escalares y para variables meteorológicas no estacionarias todas acopladas y en la experiencia de su uso por parte del grupo de investigación (Palman et al, 2017). Se compararon los resultados obtenidos con una misma configuración de rugosidad superficial y con dos configuraciones de cotas de terreno diferentes; una determinada a partir del MDE-Ar elaborado por el IGN, y otra a partir de un

Modelo Digital del Terreno (MDT) elaborado a partir de perfiles transversales relevados en campo. La principal ventaja del primero es su densidad de información y su bajo costo de obtención, ya que se encuentra disponible para descargar en forma gratuita en la página del IGN. Como desventaja se plantea el hecho de que en zonas donde existe vegetación la misma puede ser interpretada como terreno natural, induciendo a errores significativos. La intención fue comparar los resultados obtenidos con ambos modelos a fin de definir la utilidad de uno y otro, en una zona de llanura como la de estudio y donde existen áreas densamente vegetadas.

Durante los meses de abril y mayo de 2003 ocurrieron intensas precipitaciones pluviales en la cuenca de aporte santafesina del río Salado, que causaron la inundación de extensas áreas de las planicies. El caudal pico estimado, a la altura de RP 70, fue de 4.000 m³/s (Ferreira, 2005). La zona de estudio, dedicada principalmente a la ganadería, ya sea tanto para la producción de carne como de leche, ocupa un lugar de jerarquía en la economía provincial. Es en este contexto que se destaca la importancia hidroambiental de las planicies, las cuales fueron el espacio dominante de conducción del escurrimiento durante la crecida.

2 METODOLOGÍA

2.1 Modelo Digital de Elevación

Se utilizó el MDE-Arg elaborado por el IGN de la República Argentina, tomando como base el DEM obtenido por la misión SRTM llevado a cabo en cooperación entre la NASA, el German Aerospace Center (DLR), la Agencia Espacial Italiana (ASI) y la U.S. National Geospatial Intelligence Agency (NGA). El objetivo principal de la misión SRTM fue obtener un modelo digital de elevaciones global de alta resolución y calidad uniforme, a partir de datos recolectados con la técnica de interferometría radar de apertura sintética.

El MDE generado a partir de la misión SRTM fue distribuido públicamente con una resolución espacial de 1" de arco (aproximadamente 30 m) para Estados Unidos y una resolución de 3" (aproximadamente 90 m) para el resto del mundo (USGS, 2005). Mediante un convenio con la NGA, el IGN logró obtener el modelo de Argentina con resolución aproximada de 30 m por píxel. A partir de este modelo, aplicando tareas de relleno de vacíos, inclusión de datos en zonas de lagos, filtrado espacial y enmascarado de límites, se generó el MDE-Ar de aproximadamente 45 m por píxel, que se encuentra disponible en escala 1:50.000 de acuerdo con las cartas topográficas del IGN.

2.2 Obtención del Modelo Digital de Terreno (MDT) a partir de perfiles transversales

Se elaboró un MDT de la zona de estudio a partir del relevamiento en campo de perfiles transversales que incluyeron el cauce principal y la planicie, y en base a puntos acotados y curvas de nivel de las cartas topográficas del IGN. Se utilizó el método de interpolación Kriging y se obtuvo el MDT para todo el dominio de cálculo con una resolución de píxel de 30 m de lado.

En la Figura 2 se presenta un mapa de isolíneas de diferencias de cota ($\Delta h = \text{Cota MDT} - \text{Cota MDE}$) entre ambas configuraciones batimétricas para todo el dominio de modelación. Para el 85% del dominio las diferencias estuvieron entre -0.20m y +1.20m. Las mayores diferencias se dieron en zonas donde la existencia de vegetación pudo haber afectado las observaciones de radar que se utilizaron para la elaboración del MDE.

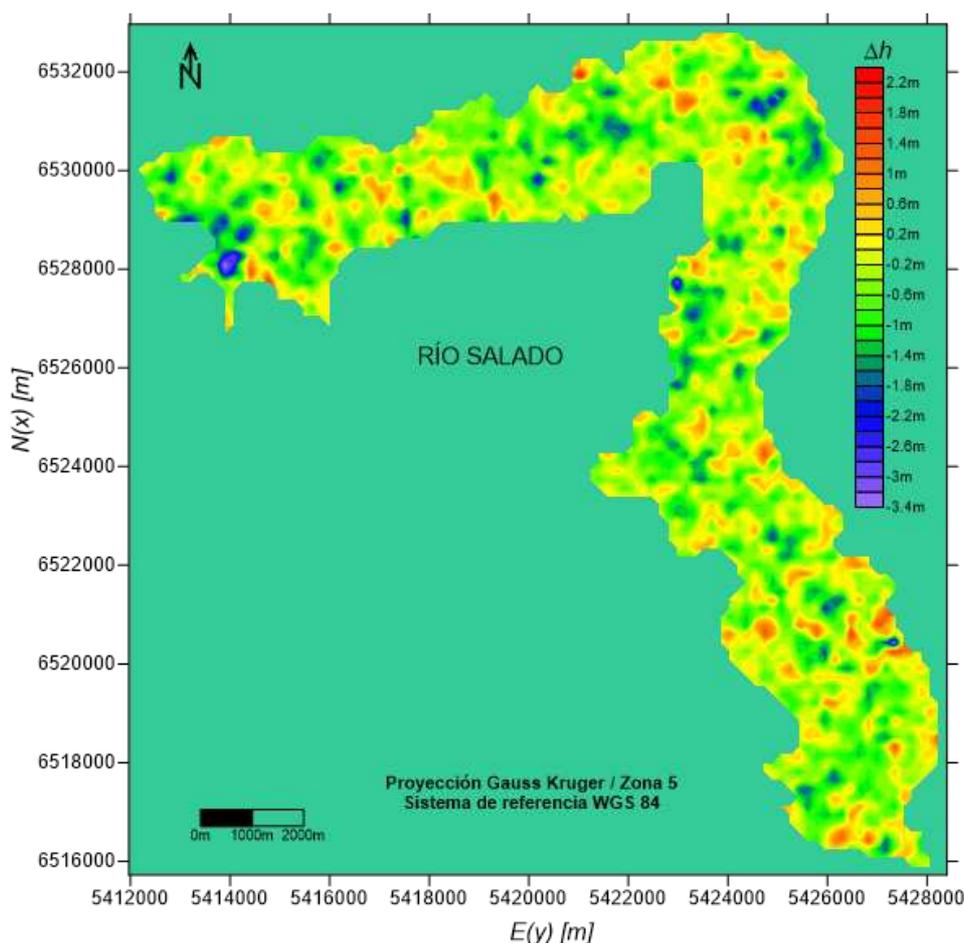


Figura 2: Isocotas de Δh (Cota MDT-Cota MDE) para todo el dominio de modelación.

2.3 Determinación de la rugosidad superficial

Bodoira et al. (2009), establecieron 6 diferentes clases (i) de vegetación presentes en el valle de aluvial, a partir de mediciones realizadas en seis trabajos de campo, sobre 17 parcelas de muestreo distribuidas en la planicie de inundación. Estos relevamientos se relacionaron con imágenes de satélite Landsat 7 ETM provistas por CONAE, y a cada grupo de nueve píxeles de 30 m de lado, se le asignó una altura l_i de la vegetación predominante en el rango de 4-300cm, representativa de cada clase i . Posteriormente, Imhoff et al. (2011) desarrollaron una metodología para calcular el coeficiente de rugosidad de n Manning con la ecuación de Cowan, en la cual para la determinación del componente que tiene en cuenta la vegetación se utilizó la clasificación elaborada por Bodoira. Esto permitió obtener un mapa temático de coeficientes de rugosidad n de Manning para todo el dominio de simulación, del siguiente modo:

Con la ecuación (1), conocida como relación de Manning-Strickler (Chow, 1959), se puede expresar el coeficiente n :

$$n = \phi(h/k)k^{1/6} \quad (1)$$

Donde la función $\phi(h/k)$ relaciona la profundidad total (H), con una medida de la altura de rugosidad superficial k de Nikuradse (Chow, 1973) de acuerdo con la ecuación (2):

$$\phi(h/k) = \frac{(h/k)^{1/6}}{18 \log(12.2 h/k)} \quad (2)$$

Basado en observaciones, Strickler (Sturm, 2001) demostró que la función $\phi(h/k) = 0.0342$ cuando la relación h/k está en el intervalo $4 < h/k < 500$, lo cual se cumple habitualmente en planicies de inundación para valores típicos de k (Abbot and Basco, 1989). En tal caso la ecuación (2) se escribe: $n = 0.0342 k^{1/6}$. Con esta relación se calcularon los valores de rugosidad, para cada elemento del dominio de modelación.

2.4 Implementación del sistema computacional SisBaHiA

Para la representación del escurrimiento sobre la planicie de inundación se utilizó el módulo hidrodinámico bidimensional (2DH) de SisBaHiA (Rosman, 2008). El modelo matemático resuelve la ecuación de conservación de masa integrada a lo largo de la vertical, ecuación (3), y las dos ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento con la aproximación de aguas someras, para escurrimientos homogéneos integrados en la vertical, ecuaciones (4) y (5) respectivamente:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial U(H + \zeta)}{\partial x} + \frac{\partial V(H + \zeta)}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - 2u\phi \sin\theta = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_o(H+\zeta)} \left(\frac{\partial((H+\zeta)\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial((H+\zeta)\tau_{xy})}{\partial y} + (\tau_x^S + \tau_x^B) \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} - 2v\phi \sin\theta = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_o(H+\zeta)} \left(\frac{\partial((H+\zeta)\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial((H+\zeta)\tau_{yy})}{\partial y} + (\tau_y^S + \tau_y^B) \right) \quad (5)$$

Donde t es el tiempo, x e y son las direcciones principales en el sentido longitudinal y transversal, respectivamente; $-h$ es la cota de fondo, $\zeta(x,y,t)$ es la cota de pelo de agua, $H(x,y,t) = \zeta + h$ es la profundidad total; U y V son las componentes de las velocidades promediadas en la vertical en las direcciones x e y respectivamente; g es la aceleración de la gravedad; ρ_o es la densidad del agua; τ_{xx} , τ_{xy} y τ_{yy} , son las tensiones turbulentas; τ_x^B y τ_y^B son las tensiones resistivas en el lecho; τ_x^S y τ_y^S las tensiones resistivas en la superficie del agua, todas ellas en las direcciones indicadas por los subíndices; ϕ es la velocidad angular de rotación de la Tierra en el sistema de coordenadas local; θ es el ángulo que indica la latitud en radianes. El tratamiento de la turbulencia está basado en la técnica de filtrado (Rosman, 1987) y es auto-ajustable en la escala de sub-grilla.

Se trabajó con dos escalas diferentes para representar correctamente la diferencia entre el cauce principal del río y la planicie de inundación (ver Figura 3). Para el cauce se emplearon entre tres y cuatro elementos, de un ancho promedio de 30 m, de modo de contar con siete a nueve nodos de cálculo en la dirección transversal a la corriente. En la planicie se emplearon tamaños de elementos más grandes que en el cauce (entre 80 y 150 m). El dominio de cálculo, comprendido entre la RP 70 y la confluencia del río Salado con el arroyo Cululú abarca una longitud aproximada de 50 km de cauce principal, y fue discretizado en elementos finitos mediante la construcción de una malla compuesta por 2431 elementos isoparamétricos cuadrangulares, de 9 nodos por elemento, lo que hace un total de 10055 nodos (ver Figura 4). Los contornos se determinaron en base a una imagen satelital radar del área de estudio obtenida siete días después del paso del pico de la crecida por la sección RP 70, que permitió

estimar el área afectada por la crecida. No se tuvieron en cuenta las formas de fondo en el armado de la malla ya que se determinó, en base a información batimétrica disponible, que las mismas no presentan un patrón bidimensional, lo cual dificulta su representación mediante una malla de dimensiones como la aplicada en el presente trabajo. El plano de referencia para la batimetría se ubicó en la cota cero IGN.

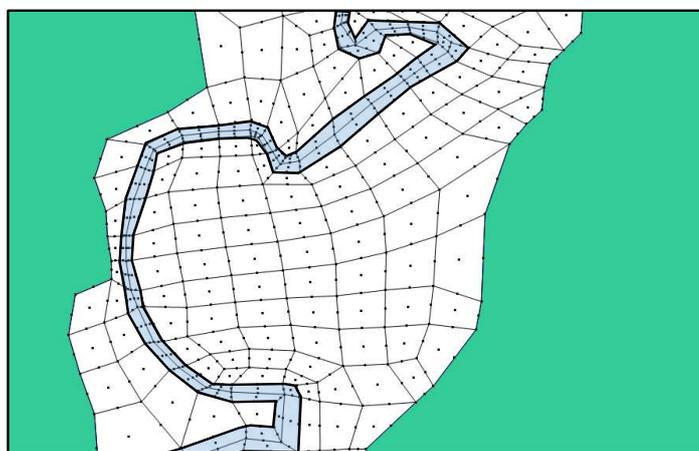


Figura 3: Detalle de los nodos (puntos) y elementos cuadrangulares (polígonos) de la malla.

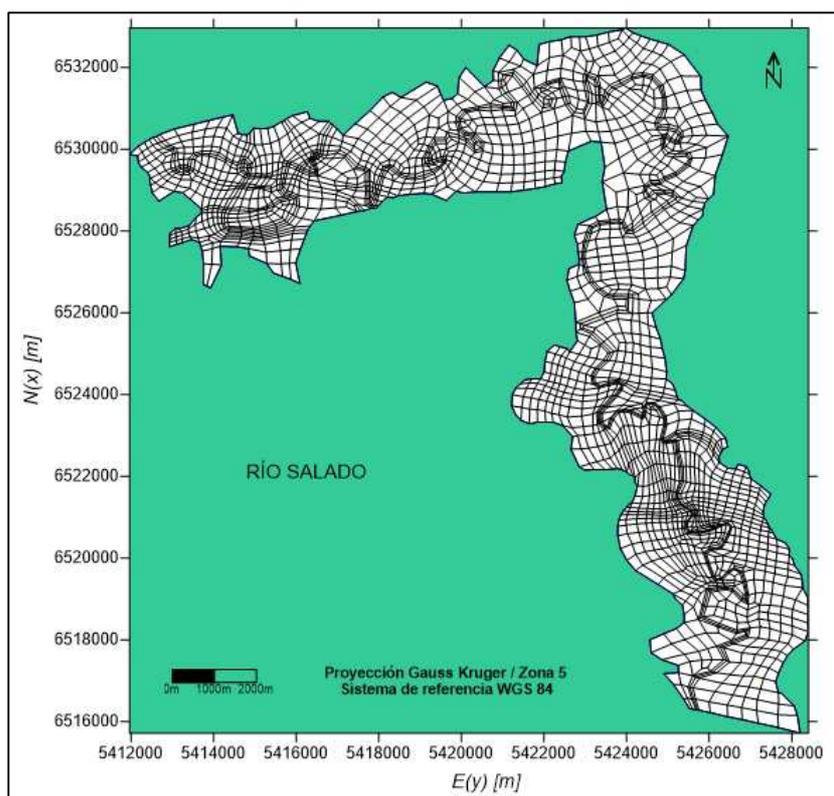


Figura 4: Malla de elementos finitos utilizada en el modelo SisBaHíA.

Para el cálculo de la hidrodinámica, se estableció como condición de borde en la sección aguas arriba (CBAA) una distribución de caudales repartido entre cauce y planicie de 20 % y 80 % respectivamente, correspondiente al caudal pico de la crecida. La sensibilidad de

resultados respecto de otras hipotéticas CBAA, será abordada en trabajos posteriores. Se admitió el supuesto de que la distribución de caudales no afecta los resultados en las secciones intermedias. En la sección de aguas abajo se fijó un nivel de agua de 19.13 m cota IGN. Se realizó una primera aproximación simulando en condiciones estacionarias para un tiempo total de 8 horas, tiempo para el cual se verificó que se estabilizaron los resultados. El intervalo temporal de cálculo (Δt) fue de 2 seg. La calibración del modelo se realizó mediante cotas de pelo de agua determinadas en el momento del pico de la crecida.

3 RESULTADOS

En la Figura 5 se muestra el campo de velocidades determinado para todo el dominio de cálculo con las dos configuraciones de batimetría, y un detalle en dos secciones en las secciones RP6 y RPin, en las cuales se contó con registros de cotas de pelo de agua. Con ambas batimetrías se observa la concentración de vectores de mayores velocidades a lo largo de la traza del cauce, excepto en determinadas secciones caracterizadas por curvas cerradas, donde el flujo desborda hacia la planicie, cortando los meandros. Esta situación se aprecia particularmente en el caso de la sección de RP6, donde existen aliviadores del puente principal que permiten el paso del escurrimiento en momentos de excedencia. La dirección de los vectores de velocidad resulta muy similar para las dos configuraciones de cotas de fondo, mientras que el módulo de velocidad calculado cuando se utilizó el MDE fue en promedio un 40% mayor que cuando se utilizó el MDT calculado a partir de perfiles transversales y puntos acotados.

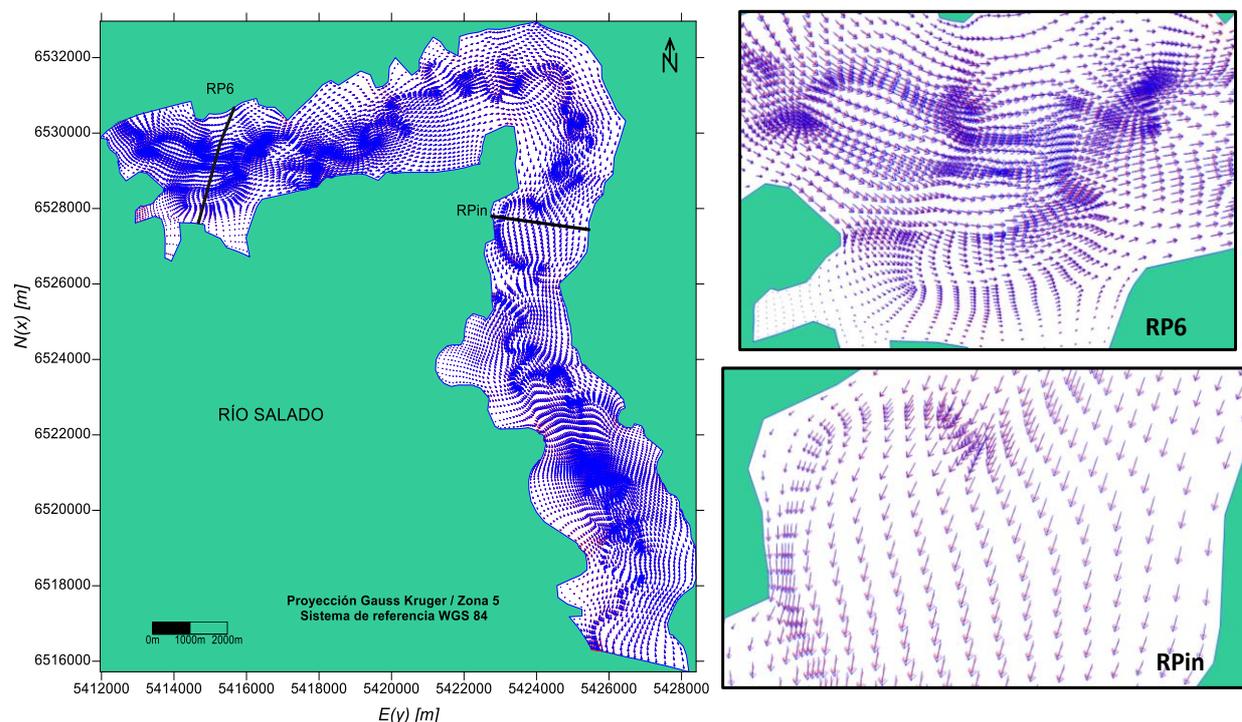


Figura 5: Campo de velocidades calculado para ambas configuraciones de batimetría. En color rojo para el MDT y en color azul para el MDE-Ar.

En las Figura 6 y Figura 7 se muestran los perfiles transversales de velocidad calculados en las secciones RP6 y RPin con las dos batimetrías. Se observa que en ambos casos, las velocidades calculadas con la batimetría basada en el MDE-Ar son del orden del 40% mayor.

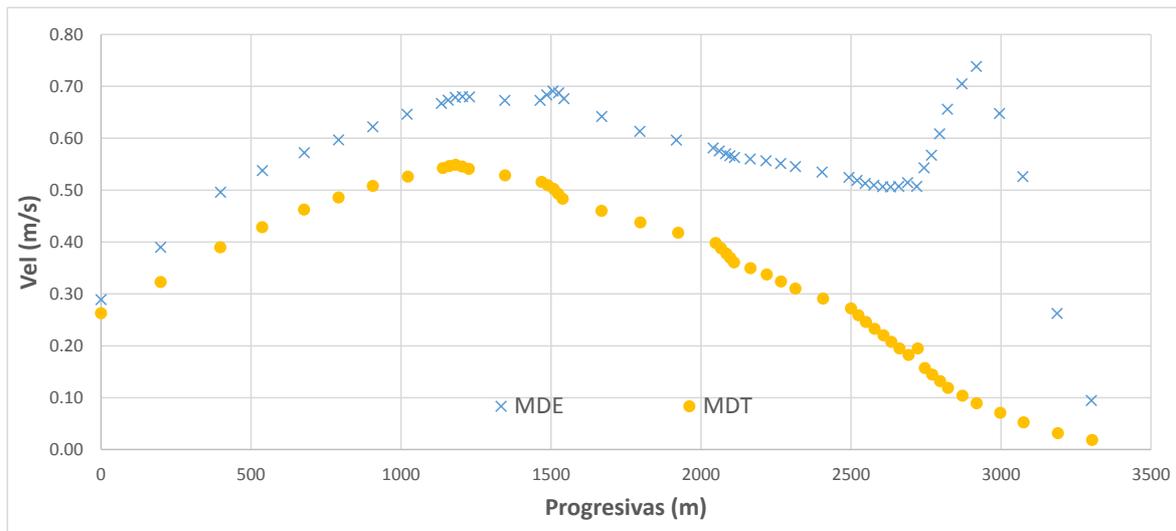


Figura 6: Perfiles transversales de velocidad en la sección RP6.

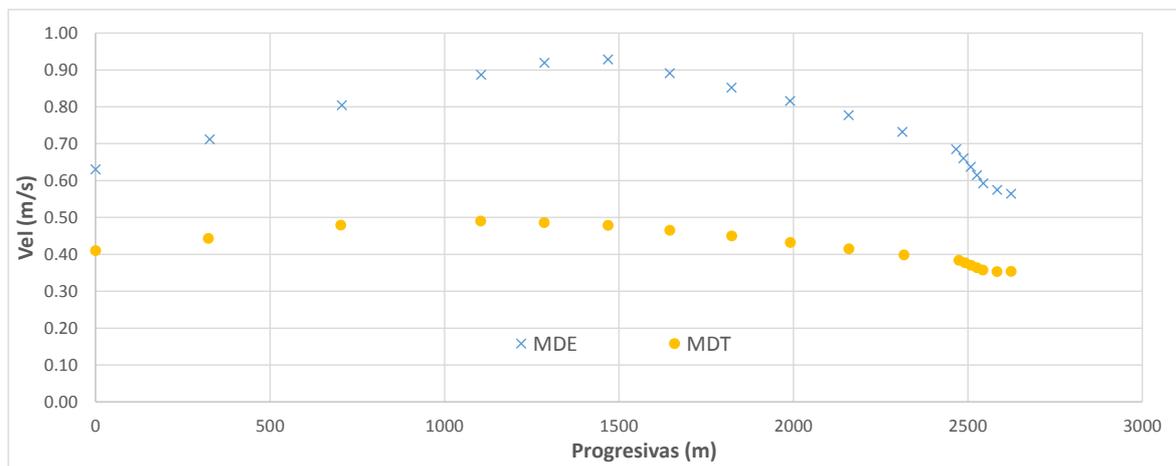


Figura 7: Perfiles transversales de velocidad en la sección RPIn.

En cuanto a las tensiones de corte, los mayores valores se calcularon en la zona del cauce principal, en el rango de 3.60-6.00 N/m². Sobre la planicie los valores promedio estuvieron en el rango 1.60-3.20 N/m², pero se identificaron zonas con valores que variaron entre 4.40-5.20 N/m², por ejemplo 4 km aguas abajo del puente de RP6 o 1 km aguas abajo de la sección Rpin. Estos lugares coinciden con zonas de baja rugosidad. En los bordes de la planicie se detectaron zonas con valores casi nulos, con bajos niveles de agua y baja velocidad, que pueden ser definidos como sectores donde potencialmente se produciría sedimentación.

Se realizó un análisis de sensibilidad de la rugosidad superficial mediante la variación de la misma en el rango de $\pm 25\%$. Los resultados fueron particularmente sensibles en los sectores con valores de rugosidad más altos (zonas de vegetación), donde para un aumento del 25% de la rugosidad, las velocidades calculadas disminuyeron en el orden del 8-10%. En el resto del dominio de modelación, las variaciones de velocidad resultaron despreciables.

Para la calibración del modelo se tomaron como referencia las cotas del pelo de agua estimadas en diferentes secciones, ya que no se contó con velocidades medidas. De acuerdo a los registros, en la sección del puente de RP6 el agua alcanzó los 23.50 m, un metro por debajo del tablero. En la entrada al Camping Municipal la cota medida fue de 23.70 m y en

una sección intermedia entre RP6 y RPin de 22.40 m. Las diferencias entre los valores mencionados y las cotas de pelo de agua calculadas mediante la simulación estuvieron en el orden del -5% a -10%.

Se definieron secciones de control donde se calculó la distribución de caudales a través del cauce y de la planicie. Los resultados mostraron que para el caudal pico, la planicie transportó entre el 67% y el 82% del caudal total.

4 CONCLUSIONES

Se determinó que la calidad y precisión de la información batimétrica cumple un rol preponderante en la simulación del escurrimiento superficial cuando se trata de representar inundaciones en zonas de llanuras.

A partir del análisis de los dos modelos topobatimétricos utilizados se determinó que el MDT representa de mejor manera la topografía real de la zona de estudio. Si bien el MDE-Ar del contiene mayor densidad de información, presenta diferencias significativas respecto al MDT en zonas de abundante vegetación, como así también apreciables variaciones de nivel entre pixeles cercanos (“ruido”) lo que, en zonas de llanura, influye considerablemente en el cálculo de las variables hidráulicas.

La complementación de los datos del MDE con información batimétrica del cauce principal resultó fundamental para la obtención de resultados adecuados. Se destaca que la batimetría del cauce aún debe ser mejorada para lograr representaciones más adecuadas.

Los resultados obtenidos demostraron la importancia de la planicie de inundación durante la crecida de abril-mayo de 2003, ya que fue por donde se transportó la mayor parte del caudal pico, llegando a transportar más del 70 % del total.

Dada la complejidad de la planicie del Salado, donde existen zonas de suelo desnudo, cultivos, montes, se requiere además de la correcta representación de la topografía, un particular análisis en la determinación de la rugosidad superficial.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado en el marco del Proyecto de Investigación CAI+D 2016: “*Estudio sedimentológico, geológico e hidráulico del transporte y sedimentación de la carga en suspensión en ambientes fluviales de llanura*”, PIC 50420150100048LI, subsidiado por la Universidad Nacional del Litoral (Santa Fe).

REFERENCIAS

- Abbot, M.B. and Basco, D.R., Computational Fluid Dynamics, an Introduction for Engineers, Longman Group, UK Limited, 1989.
- Bodoira F., Trento A. and Graciani S., Determination of roughness coefficient in floodplains using Landsat images: the case of the Salado river lower basin (Argentina), *6th Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, RCEM 2009*, 21 a 25 setiembre de 2009, Santa Fe, Argentina. Eds. Vionnet C., Perillo G., Latrubesse E. y García M, 2009.
- Chow, Ven Te, *Hidráulica de canales abiertos*. Santa Fé de Bogotá: McGraw Hill, 1959.
- Cook A. and Merwade V., Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping. *Journal of Hydrology*, 377:131-142, 2009.
- De Gonzalo, A.C., Propuesta metodológica de modelización hidrometeorológica e hidrodinámica enfocada a la ordenación del riesgo de inundación: Aplicación a la cuenca del Arroyo Pejibaye (Costa Rica), *Universidad Politécnica de Madrid, España*, 2011.

- Eulliades P. et al., Modelos Digitales de Elevación para simulación computacional de inundaciones: Interferometría vs. Cartografía. *First South American Congress on Computational Mechanics*, october 2002, Parana-Santa Fe, Argentina. Eds. Idelsohn S.R., Sonzogni V. E., y Cardona A., Vol. XXI, pp 2267-2277, 2002.
- Ferrerira, C. G. 2005. La crecida extraordinaria del Río Salado en Abril - Mayo de 2003. (Provincia de Santa Fe - Argentina) – Aspectos hidrológicos. *XX Congreso Nacional del Agua. Mendoza- Argentina*.
- García, L., Marco internacional y discusión de los conceptos del riesgo. *The OFDA/CRED International Disaster Database*, 2010.
- Horritt, M.S. and Bates P.D., Effects of spatial resolution on a raster based model of flood flow, *Journal of Hydrology*, 326:153-165, 2001.
- Imhoff M. et al., Simulación hidrodinámica de la planicie del río Salado (Santa Fe), *V Simposio Regional de Hidráulica de Ríos*, Santiago del Estero, Argentina, 2011.
- Paoli, C. U., Gestión integrada de crecidas. Guía y caso de estudio. *European Union, Report EUR 27493 ES*, 2015.
- Palman, L., Imhoff, M., Pez, M., Villalba, S., Alvarez, A. M., Trento, A., Gallo, M. Simulación hidrodinámica para un escenario de cauce lleno en el río Salado (Santa Fe), *Mecánica Computacional*, XXXV: 989-1000, 2017.
- Rosman, P., “Referência Técnica do SisBaHiA®” (<http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br>), 2008.
- Sanders B. F., Evaluation of on-line DEMs for flood inundation modeling. *Advances in Water Resources*, 30:1831-1843, 2007.
- Sturm, T.R. Open Channel Hydraulics, *McGraw-Hill. New York*, 2001.
- USACE, Hydrologic modeling system HEC-HMS Technical Reference Manual. *United States Army Corp of Engineers. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA*, 149p, 2000.
- USGS, United States Geological Survey, *Shuttle Radar Topography Mission*, URL: <http://srtm.usgs.gov>, 2005.