

## **Validación con información generada por los afectados, de una simulación hidrológica-hidráulica de la inundación extraordinaria del 7 de marzo de 2025 en General Daniel Cerri, Buenos Aires, Argentina**

### **Validation with information generated by those affected, of a hydrological-hydraulic simulation of the extraordinary flood of March 7, 2025 in General Daniel Cerri, Buenos Aires, Argentina**

**Sandra Noemí Fernández<sup>(1)</sup> y Daniel Enrique Pérez<sup>(2)</sup>**

<sup>(1)</sup> Universidad Nacional del Sur, Departamento de Ingeniería, Bahía Blanca, Argentina.  
Comisión de Investigaciones Científicas, La Plata, Argentina.

e-mail: sandrafernandezpretini@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5430-4825>

<sup>(2)</sup> Universidad Nacional del Sur, Departamento de Ingeniería, Bahía Blanca, Argentina.

e-mail: perezdanielenrique@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1930-0957>

#### **RESUMEN**

Se presenta la simulación y validación de una tormenta extraordinaria en General Daniel Cerri. La tormenta tuvo una recurrencia de 100 años según el Servicio Meteorológico Nacional. En base a simulaciones previas, se implementan el HEC-HMS acoplado con HEC-RAS en la zona de estudio. Se usó el método del Soil Conservation Service del número de curva, Kirpich para el tiempo de concentración de las subcuencas, Muskingham para el tránsito de la onda de crecida, y mediciones de mareógrafos locales. Con HEC RAS, se usaron las ecuaciones de aguas someras (SWE) sobre una grilla no uniforme, que se adapta al modelo de terreno. Se consideraron áreas con distintos valores de rugosidad de  $n$  de Manning. Se presentan los hidrogramas simulados con HEC-HMS, sus correspondientes parámetros característicos, la evolución en el tiempo de la crecida dentro del área de estudio. Se validó la simulación por medio de datos aportados por los afectados de la inundación la cual describe aceptablemente los niveles de agua alcanzados en el casco urbano de la ciudad. Se logra disponer de una herramienta validada para la toma de decisiones estructurales y no estructurales que permita mitigar los efectos de eventos de este tipo.

**Palabras clave:** HEC-HMS y HEC-RAS Acoplados, Inundación Extraordinaria, General Daniel Cerri, Validación, Información Generada por Afectados.

#### **ABSTRACT**

The simulation and validation of an extraordinary storm in General Daniel Cerri is presented. The storm had a 100-year recurrence according to the National Meteorological Service. Based on previous simulations, HEC-HMS coupled with HEC-RAS was implemented in the study area. The Soil Conservation Service curve number method, Kirpich for subbasin time of concentration, Muskingham for flood wave transit, and local tide gauge measurements were used. With HEC-RAS, shallow water equations (SWE) were used on a non-uniform grid fitted to the terrain model. Areas with different Manning's  $n$  roughness values were considered. The hydrographs simulated with HEC-HMS, their corresponding characteristic parameters, and the evolution of the flood over time within the study area are presented. The simulation was validated using data provided by those affected by the flood, and adequately describes the water levels reached in the city center. This provides a validated tool for structural and non-structural decision-making that can mitigate the effects of such events.

**Keywords:** Coupled HEC-HMS and HEC-RAS, Extraordinary Flood, General Daniel Cerri, Validation, Information Generated by affected.

## INTRODUCCIÓN

La localidad de General Daniel Cerri (GDC) se encuentra a orillas del estuario de Bahía Blanca al sudoeste de la provincia de Buenos Aires, República Argentina. Su población es de 8726 personas según el censo de 2022 (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos [INDEC], 2022). Del 5 al 8 de marzo de 2025, una tormenta extraordinaria de 100 años de recurrencia según el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (Servicio Meteorológico Nacional, 2025), provocó inundaciones en la localidad de GDC y Bahía Blanca, donde hubo que lamentar 20 muertes, varias de ellas en GDC. Si bien, existen antecedentes de tormentas similares (6 y 7 de abril de 1944) (Gil, 2009), el reciente evento fue mucho más crítico y sorprendió a la población desprevenida.

Existen solo dos antecedentes de simulaciones de inundaciones en GDC (Fernández et al., 2023; Fernández y Pérez, 2024) donde se implementaron los programas HEC-HMS y HEC-RAS del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos. A través de estos, se determinaron zonas de diversa peligrosidad causadas por tormentas de diseño de recurrencia 50 años en combinación con mareas eólicas extraordinarias reales, para el casco urbano de GDC. Desafortunadamente la carencia de observaciones sistemáticas de parámetros típicos usados para validar motivó el uso de información que permite indirectamente la validación de los modelos.

En base a los trabajos realizados por Fernández et al. (2023) y Fernández y Pérez (2024), sumados a datos obtenidos de diversas modelaciones en diversas cuencas del sistema de Ventania (Fernández et al., 2015; Fernández et al., 2019; Fernández et al., 2021; Fernández et al., 2022), y recopilados del evento del 5 al 8 de marzo de 2025, se validará la simulación de la mencionada precipitación extraordinaria.

## OBJETIVOS DEL TRABAJO

- Implementar el HEC-HMS para estimar el hidrograma de crecida, tiempo de llegada de pico, caudal pico y volumen escurrido, para la tormenta del 5 al 8 de marzo de 2025.
- Implementar el HEC-RAS para estimar la lámina de agua que cubrió a GDC, y validarla con datos de encuestas obtenidos de las redes sociales para la tormenta del 5 al 8 de marzo de 2025.
- Avanzar con una simulación que proporcione una herramienta validada para GDC, que

permita apoyar la toma de decisiones de tipo estructural y no estructural, con el fin de mitigar los efectos destructivos de un evento de esta magnitud.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Zona de estudio

La localidad de GDC se encuentra a orillas del estuario de Bahía Blanca, en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina (Figuras 1a, b y c). En la cercanía del casco urbano, desembocan: I) un canal construido con fines de riego (Canal Cuatrerros), que bordea la ciudad y desagua parte del caudal del río Sauce Chico (Figura 2), II) el arroyo Saladillo de García, III) arroyo Dulce, que luego de confluir con el Saladillo de García, desemboca hacia el norte de la localidad en el estuario de Bahía Blanca (Figuras 1b y c).

La Figura 2 muestra las líneas férreas y carreteras sobre terraplenes que configuran un polígono alrededor del casco urbano de GDC (Anillo de GDC), con sobreelevaciones por encima del terreno natural de hasta 6 m en distintos lugares. También figuran canales artificiales que sirven de drenaje. Hacia el sudeste, los terraplenes ferroviarios impiden que las mareas ingresen a la ciudad. Los mismos funcionan como diques y permiten el escurrimiento solo a través de los puentes y alcantarillas, ya sea ingresando o saliendo por estas, siempre y cuando los terraplenes no sean sobrepasados. Los puentes sobre el terraplén sudeste de la ciudad (Ferrocarriil Línea Roca a Patagones) en la Figura 2 permiten el ingreso del agua del estuario debido a las mareas, anegando y dificultando el drenaje del agua dulce proveniente del continente (Fernández et al., 2023).

### Características de las cuencas del arroyo Saladillo de García y su afluente, el arroyo Dulce

La cuenca del arroyo Saladillo de García se encuentra ubicada geográficamente entre los meridianos 62° 12' O y 62° 32' O y los paralelos de 38° 09' S y 38° 43' S (Figura 1c), cubriendo una superficie total de 834 km<sup>2</sup> y la longitud del río es de 39 km. Limita hacia el este con la cuenca del arroyo Napostá Grande y al oeste con la cuenca del río Sauce Chico (Figura 1c). La cuenca se subdivide en dos, la correspondiente al arroyo Saladillo de García propiamente dicho y la de su afluente el arroyo Dulce. Ambos nacen en las estribaciones del sistema de Ventania, de carácter intermitente y se desarrollan en un ambiente de llanura en el cual predominan, en general, valores

bajos de pendiente (González, 2018). La cuenca se ha degradado debido a las actividades antropogénicas, entre ellas el vertido de aguas servidas y los desechos de los frigoríficos (Spagnolo, 2011). La confluencia

entre el Dulce y el Saladillo de García propiamente dicho se produce dentro del Anillo de GDC (Figura 2) que rodea a la localidad de GDC, para luego desembocar en el estuario de la Bahía Blanca.

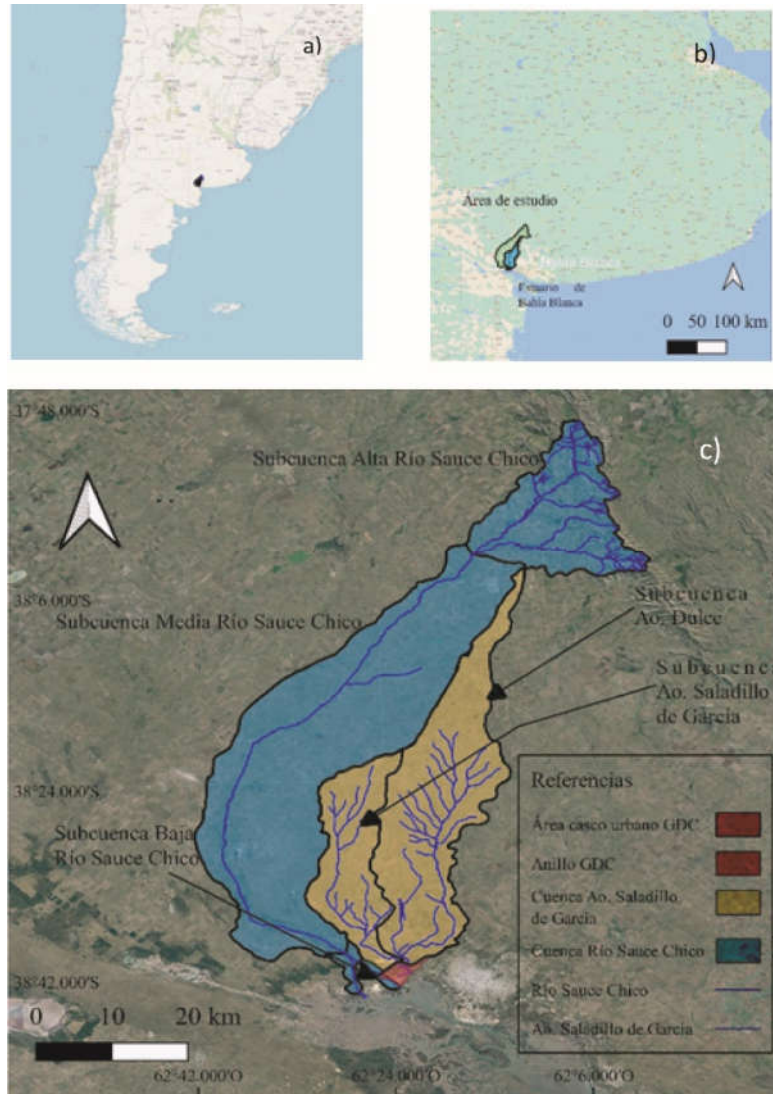


Figura 1. a) Ubicación General de la zona de estudio, b) ubicación relativa dentro de la provincia de Buenos Aires, c) casco urbano de GDC, cuencas, subcuencas y drenaje de la zona de estudio. Fuente: elaboración propia en base a Fernández et al. (2023).

#### Características de la cuenca del río Sauce Chico

El río Sauce Chico, principal curso de agua en el sector, se encuentra ubicado geográficamente entre los meridianos  $61^{\circ} 59' O$  y  $62^{\circ} 41' O$  y los paralelos  $37^{\circ} 51' S$  y  $38^{\circ} 44' S$ . Limita al este con la cuenca del Saladillo de García (Figura 1c). Nace en los faldeos occidentales del sistema de Ventania y desemboca en el estuario de

Bahía Blanca. Posee un área de  $1596 \text{ km}^2$  y la longitud del río es de 162 km. En función de las pendientes se puede subdividir en cuenca alta, media y baja (Figura 1c). La parte alta corresponde a las nacientes y recibe el aporte de las sierras del sistema de Ventania. El sector medio no recibe aportes substanciales y se desarrolla en pendientes relativamente bajas. La

cuenca inferior se considera que comienza en el partidor ubicado en el paraje La Horqueta, donde una porción del caudal es desviada por el Canal Cuatrerros con fines de riego y pasa a través de la localidad de GDC (Figura 2). El cauce natural desemboca más al

sur del Estuario de Bahía Blanca (Figura 1c) (Torrero, 2009). De esta manera, el Sauce Chico presenta dos desembocaduras bien diferenciadas siendo el Canal Cuatrerros el que puede producir inundaciones en el casco de la ciudad (Spagnolo, 2011).

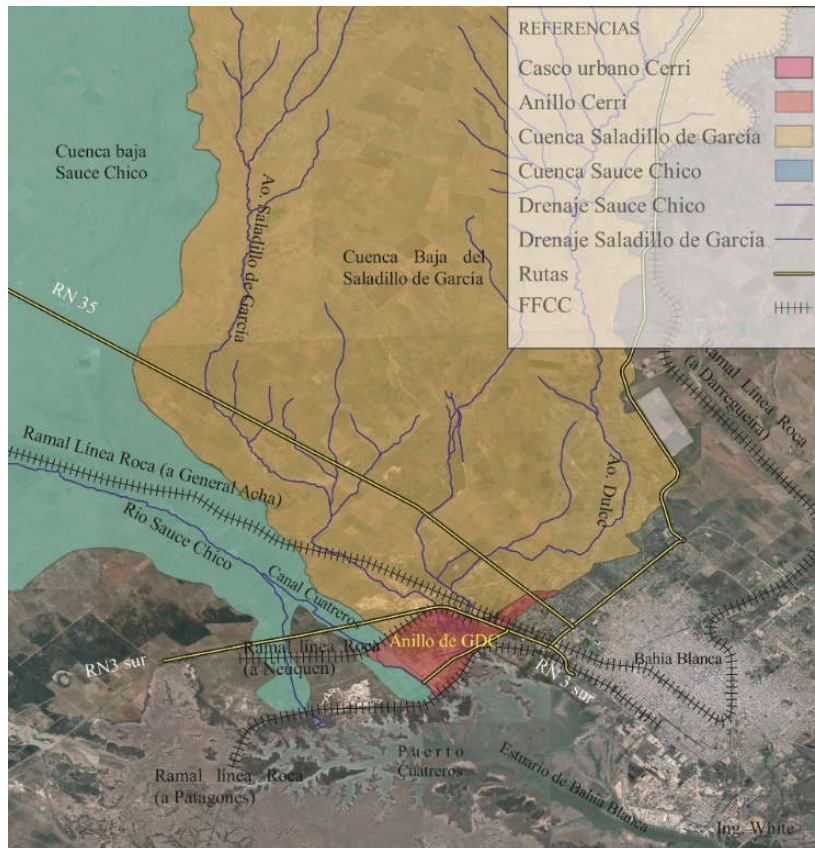


Figura 2. Anillo de GDC delimitado por terraplenes carreteros y ferroviarios. Fuente: Fernández et al. (2023).

### Niveles de marea

La circulación general del estuario de Bahía Blanca es dominada por una onda de marea semidiurna (Perillo y Piccolo, 1991) con un rango medio, en el Canal Principal, de 3.04 m en sicigia y 2.5 m en cuadratura. Las corrientes son reversibles con velocidades máximas promediadas verticalmente de 1.2 y 1.05 m/s para condiciones de reflujos y flujo, respectivamente (Perillo et al., 1987).

Los niveles de marea fueron registrados por el mareógrafo del Consorcio de Gestión del Puerto de Bahía Blanca (CGPBB) (s.f.), ubicado en Ingeniero White (38° 47' 27.10" S; 62° 16' 7.42" O). Las observaciones están referidas al datum localizado 2.63 m debajo del nivel medio. A los efectos de la

simulación, se desplazaron los tiempos y las alturas de marea para contemplar la distancia entre GDC y la ubicación del mareógrafo (Figura 3).

### Modelo de terreno

Para la cuenca del Saladillo de García y río Sauce Chico se usaron los modelos de terreno propuestos en Fernández et al. (2023), basados en imágenes tipo raster provistas por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) (Figura 4). Asimismo, el modelo digital de terreno usado para el sector del Anillo de GDC se toma de Fernández y Pérez (2024), que incluye la incorporación en el relieve de los terraplenes ferroviarios y carreteros. También canales artificiales de drenaje y riego (Fernández y Pérez, 2024) (Figura 5).

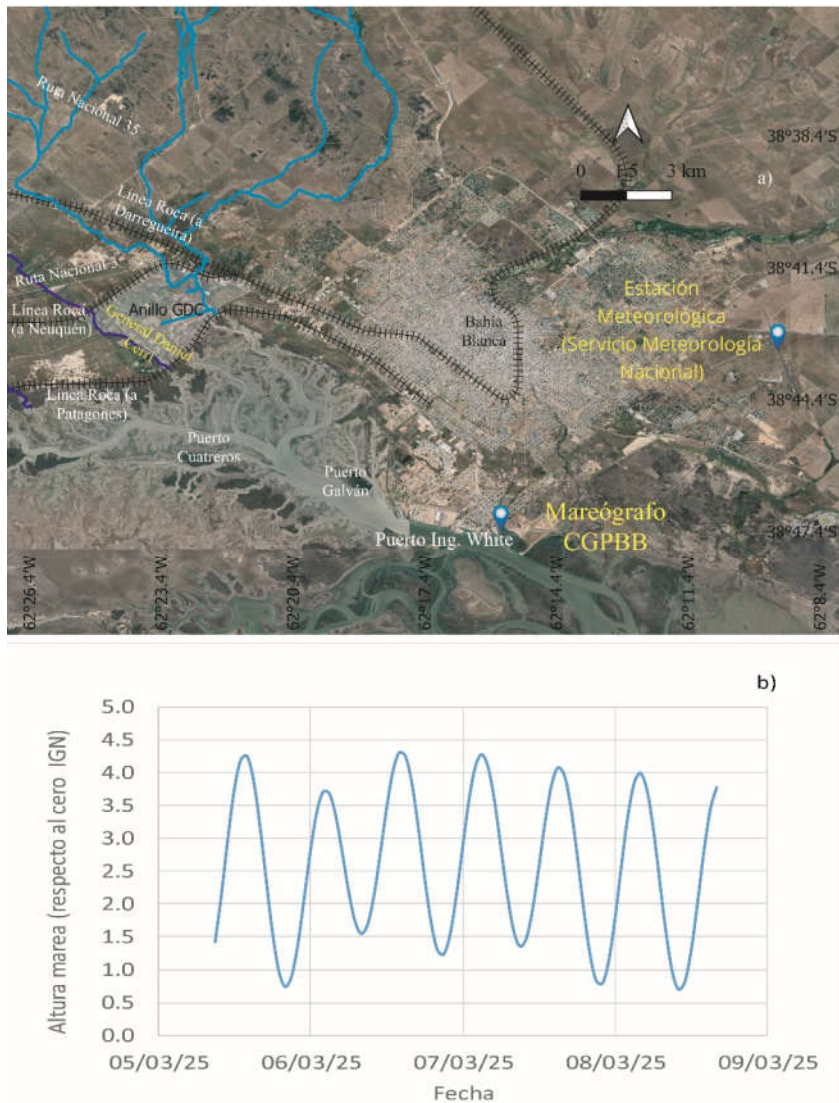


Figura 3. a) Ubicación del mareógrafo, b) marea registrada en Ingeniero White. Fuente: Elaboración propia en base a datos del CGPBB.

### Precipitación

La tormenta producida entre el 5 y 8 de marzo de 2025, fue registrada en varios pluviómetros instalados en la zona, por la Bolsa de Cereales y Productos de Bahía Blanca (BCyPBB). La Tabla 1 muestra las coordenadas donde se ubican estas estaciones meteorológicas y la Figura 6 ilustra la localización de las mismas con sus correspondientes nombres. Se incluye la estación meteorológica del Aeropuerto Comandante Espora (Espora) perteneciente al Servicio Meteorológico Nacional.

El hietograma correspondiente a la estación meteorológica Espora del SMN, proporciona la precipitación total en intervalos de longitud variable (SMN, 2025). No especifica la lluvia caída hora por hora. Por lo tanto, se decidió usar el porcentaje de precipitación caída hora por hora del hietograma de la estación Grünbein y aplicarlo a la precipitación total de la estación Espora del SMN. De esta manera se conservan la precipitación total medida en Espora y la forma del hietograma de Grünbein (Figura 6).

Las Figuras 7 a 10 muestran los hietogramas registrados.

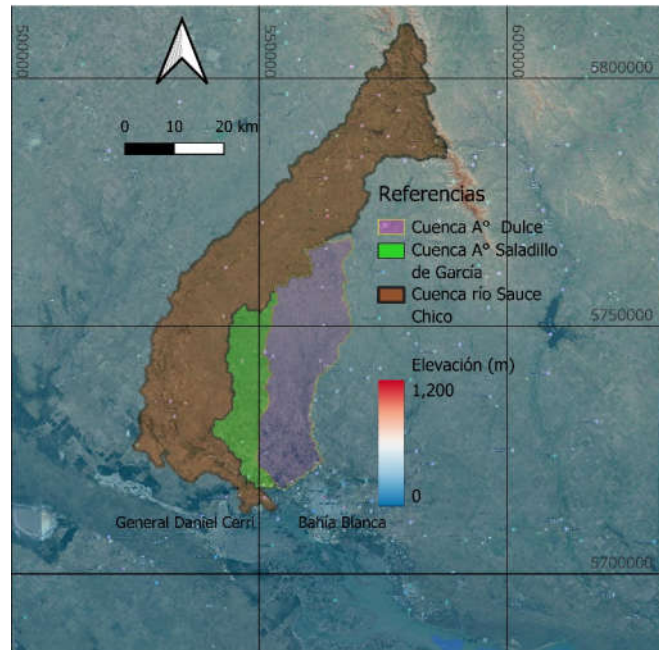


Figura 4. Modelo digital de terreno usado para el cálculo de las crecidas en la cuenca en estudio. Fuente: Fernández et al. (2023).

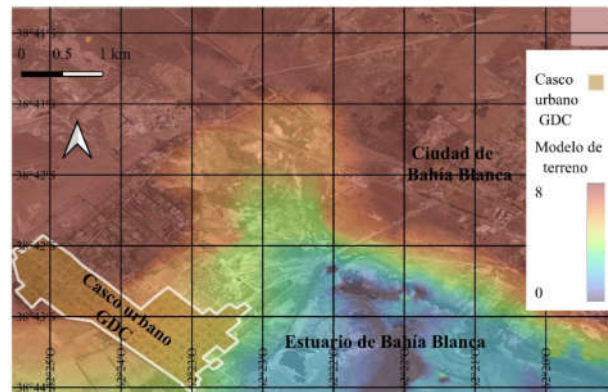


Figura 5. Modelo de terreno usado para el anillo de GDC. Fuente: Fernández y Pérez (2024).

Tabla 1. Coordenadas geográficas y planas (Universal Transverse Mercator faja 20S) de las estaciones meteorológicas utilizadas.

Nombre de la Estación	X (m)	Y (m)	Latitud (sur)	Longitud (oeste)
Espora	5712739.63	572724.651	38° 43.9998'	61° 58.9998'
Grünbein	5709327.27	577150.07	38° 45.6772'	62° 06.7012'
Cabildo	5726989.36	589677.827	38° 35.9084'	61° 58.2165'
La Vitícola	5741745.85	562527.304	38° 28.2295'	62° 17.0133'
Bajo Hondo	5705842.72	597566.716	38° 47.4816'	61° 52.5223'
Funke	5768243.36	581346.705	38° 13.8452'	62° 04.1535'
Saavedra	5810303.44	554840.554	37° 51.1317'	62° 22.6931'
Pigüé	5853952.65	547299.057	37° 28.1912'	62° 28.5896'
Sierras Grandes	5775767.84	594979.678	38° 09.6948'	61° 55.0181'

Fuente: Datos de la BCyPBB (2025).

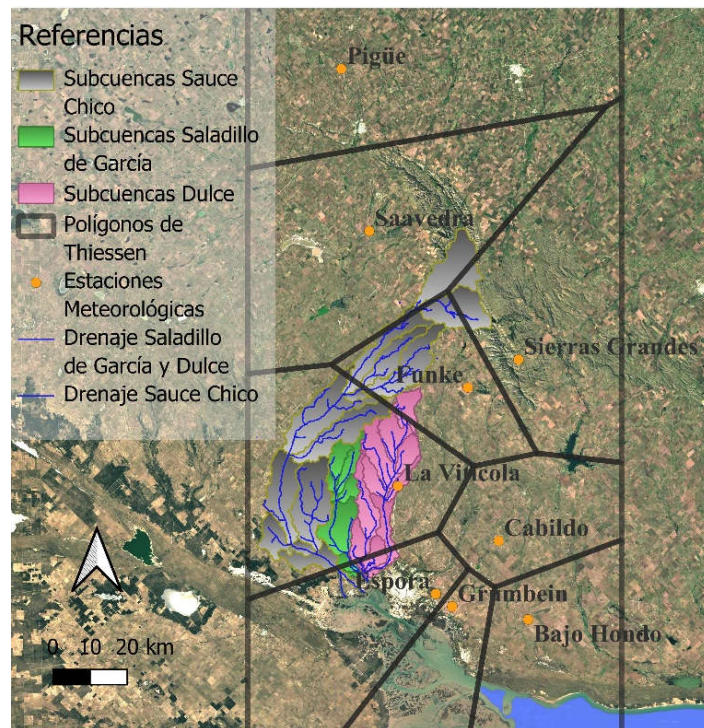


Figura 6. Ubicación de las estaciones meteorológicas y polígonos de Thiessen sobre las subcuencas de los cursos de agua estudiados. Fuente: elaboración propia en base a datos de la BCyPBB (2025).

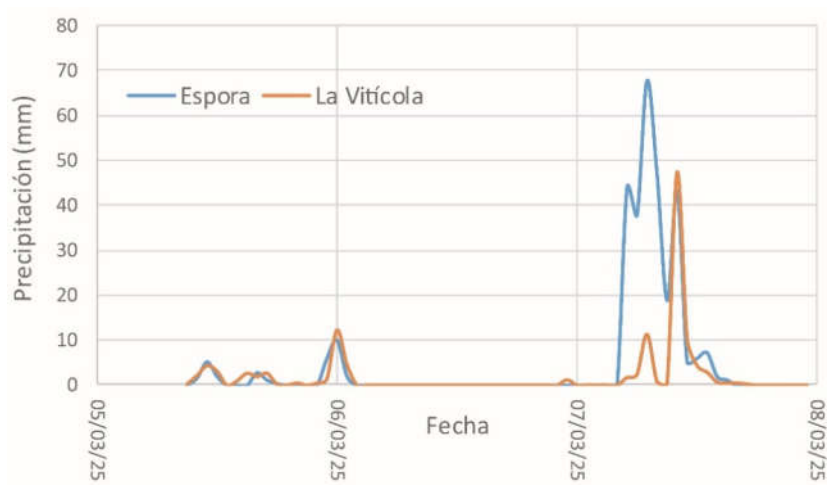


Figura 7. Hietogramas medidos en las estaciones meteorológicas de Espora (Fuente: SMN, 2025) y La Vitícola (Fuente: BCyPBB, 2025).

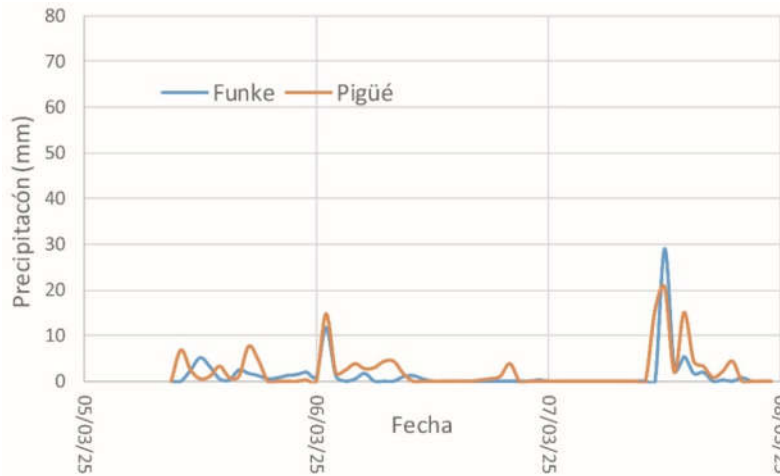


Figura 8. Hietogramas medidos en las estaciones meteorológicas de Funke y Pigüé. Fuente: BCyPBB (2025).

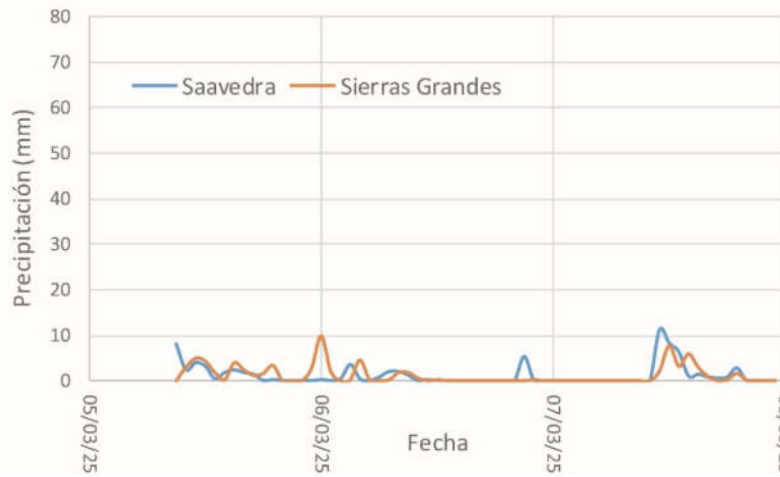


Figura 9. Hietogramas medidos en las estaciones meteorológicas de Saavedra y Sierras Grandes. Fuente: BCyPBB (2025).

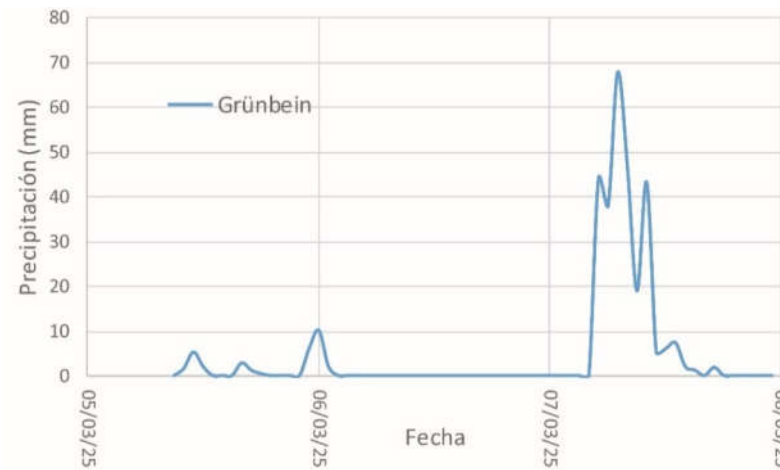


Figura 10. Hietograma medido en la estación meteorológica de Grünbein. Fuente: BCyPBB (2025).

Se desprende de las Figuras 7 a 10 que la tormenta caída en la zona no fue uniforme. La mayor intensidad se registró cerca de la ciudad de Bahía Blanca y GDC. Las partes altas de las cuencas que aportan a los ríos y arroyos causantes de la inundación son significativamente menores. Se aplicó polígonos de Thiessen (Figura 6) sobre las subcuencas de los arroyos y ríos considerándose un pluviómetro virtual en cada subcuenca, cuyo hietograma es el promedio ponderado de precipitación, respecto de las áreas, en que cada polígono de Thiessen la subdivide. La Figura 11 muestra los valores de precipitación total en cada una de las subcuencas consideradas, el cual representa el modelo de precipitación usado.

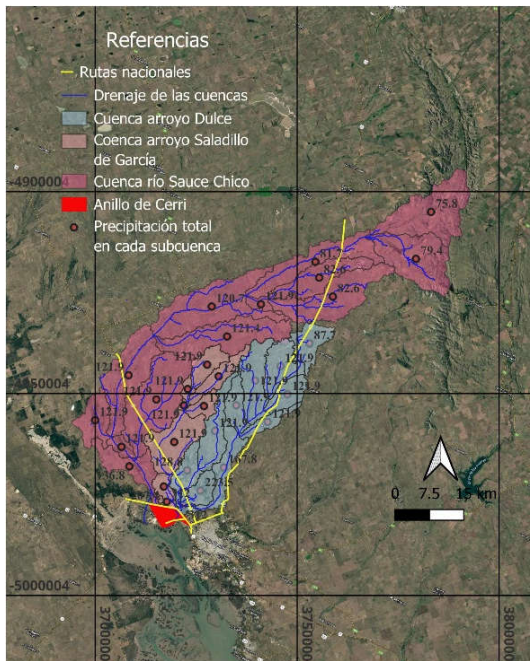


Figura 11. Precipitaciones totales en cada una de las subcuencas estudiadas. Fuente: Elaboración propia.

### Implementación de los modelos

Se trabaja con los programas HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center, 2000 y 2016) y HEC-RAS (United States Army Corps of Engineers, 2020 y 2021) acoplados, es decir, las salidas del HEC-HMS son las condiciones de borde del HEC-RAS.

### Implementación del HEC-HMS

Se ha utilizado el HEC-HMS 4.12 para la simulación de las cuencas del arroyo Saladillo de García, su afluente el arroyo Dulce y el río Sauce Chico. Este

software permite simular la transformación de lluvia en escorrentía mediante un sistema que integra diferentes métodos hidrológicos y se basa en estructurar la cuenca origen en subcuencas asociadas a los cauces de la red fluvial.

Se implementó el método de Muskingum para el tránsito de avenidas. Este método modela el almacenamiento volumétrico de creciente en un río mediante la combinación del almacenamiento de cuña y prisma (Linsley et al., 1986). Asimismo, los valores de los tiempos de concentración fueron estimados en base a Kirpich (Chow et al., 1994).

El ajuste fue realizado en base a los siguientes parámetros:

- CN [Número de Curva del Soil Conservation Service del United States Department of Agriculture (U.S.D.A.)] que contempla el tipo de suelo de la cuenca y su humedad inicial, y permite calcular la precipitación efectiva de una tormenta y el escurrimiento superficial (Hydrologic Engineering Center, 2000; Hydrologic Engineering Center, 2016).
- Abstracción inicial. Evalúa la capacidad de la cuenca de retener y percolar la precipitación. El agua escurre solo una vez que la lluvia caída alcanza el valor de la Abstracción Inicial.
- Almacenamiento máximo e inicial. Toma en cuenta la retención de agua por el efecto de árboles, arbustos, pastos y cultivos. Una vez colmada esta capacidad de retención, el agua comienza a caer al suelo. Este volumen es evaporado en su totalidad si las condiciones meteorológicas lo permiten.

### Implementación del HEC-RAS

#### Coefficiente de rugosidad de Manning

El programa HEC-RAS permite simular la rugosidad del terreno. La estimación del coeficiente de rugosidad de Manning, se realizó siguiendo las guías del Soil Conservation Service (Arcement y Schneider, 1989). Este método permite estimar el coeficiente de rugosidad de Manning según la ecuación (1):

$$n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m \quad (1)$$

donde  $n_b$  corresponde a la rugosidad básica del suelo,  $n_1$  la rugosidad debida a las irregularidades del suelo como pozos, depresiones, montículos, etc.,  $n_2$  toma en cuenta la variación dentro de las secciones del canal,  $n_3$  aplica a las obstrucciones dentro de la planicie,  $n_4$  representa la rugosidad debida a la vegetación y  $m$  es un coeficiente de meandrosidad que se considera igual a 1.

En función de las observaciones en las campañas de relevamiento y la información obtenida por medio de imágenes satelitales, se adoptó un plano de rugosidad del terreno asignándole valores de  $n$  de Manning a cada subárea (Figura 12).

### Grilla de cálculo HEC-RAS

En base al modelo de terreno elaborado (Figura 5), se generó una grilla de cálculo de 30 x 30 m. Las correspondientes líneas de quiebre sobre cada uno de los terraplenes, canales naturales y artificiales existentes fueron forzadas para generar la grilla de cálculo adaptada (forma irregular). Por medio de la herramienta de modificación de terreno de la aplicación RAS Mapper, se modificaron las alturas a lo largo de las vías ferroviarias y carreteras que el modelo de terreno no alcanza a representar. De la misma manera, el Canal Cuatros y un canal artificial de desagüe fueron representados en base a mediciones de campo. La zona urbana, fue corregida por medio de la carta topográfica del IGN, para luego reemplazarla con el resto del modelo de terreno rural. De esta manera se logró representar el terreno y la influencia antrópica en la zona de estudio (Figura 13).

Desafortunadamente, no se cuenta con información de la zona urbana, lo que no permite elaborar con mayor detalle del modelo de terreno urbano.

### Condiciones de borde y estructuras hidráulicas

Las condiciones de borde externas entrantes al área de cálculo (hidrogramas del arroyo Saladillo de García, arroyo Dulce y río Sauce Chico) fueron incorporadas (Figura 13). Las variaciones temporales de la marea que condicionan el libre desagote de la crecida, fueron igualmente implementadas. Sobre el polígono de la grilla se agregó la precipitación correspondiente como condición de borde. Sobre los terraplenes se implementaron los puentes y alcantarillas utilizando información previamente relevada (Fernández y Pérez, 2024) (Figura 14 y Tabla 2).

### Datos para la Validación

Se recurrió a una consulta a la población damnificada por medio de un formulario de Google a través de redes sociales, la cual permitió obtener la información de la profundidad máxima alcanzada por el agua en el casco urbano de GDC. En la misma se aclara que los datos serán usados para validar el modelo y son de carácter anónimo. Es así que 64 personas brindaron desinteresadamente la información de su domicilio, la máxima altura agua respecto del nivel de vereda, la hora a la que esto se produjo, la hora de entrada de agua y desagote final de sus casas. Esta información fue depurada volcada en la Figura 15.

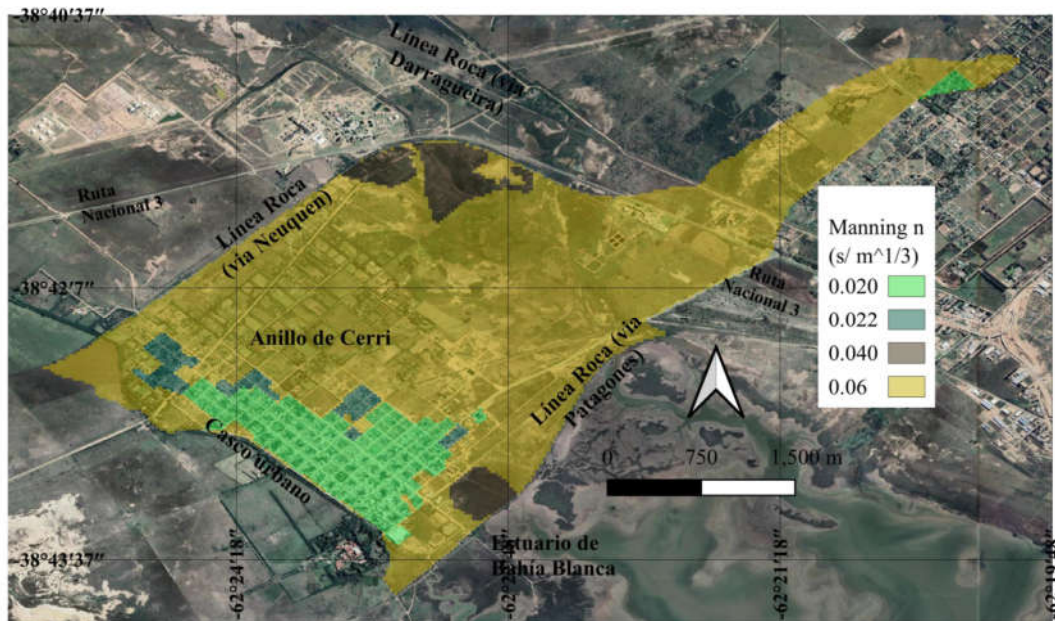


Figura 12. Distribución de  $n$  de Manning dentro del Anillo de Cerri, líneas férreas terraplenadas y Ruta Nacional N°3 alteada.

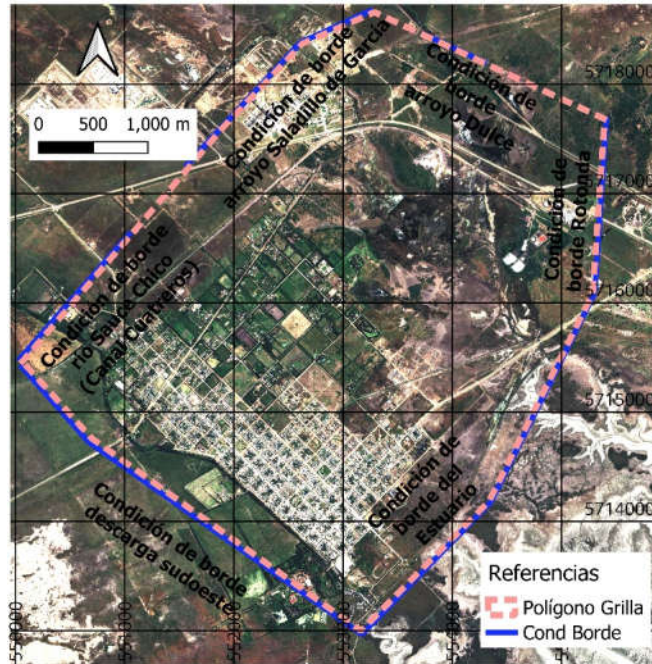


Figura 13. Grilla de cálculo para el anillo de GDC y condiciones de borde usadas. Fuente: Elaboración propia.

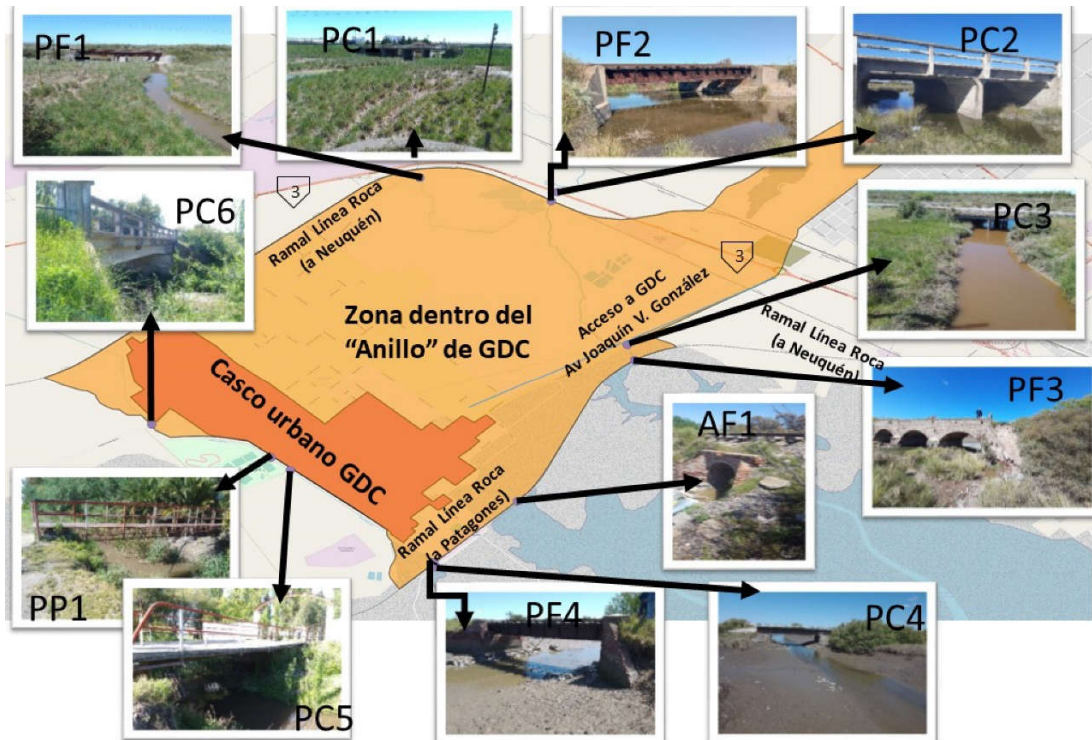
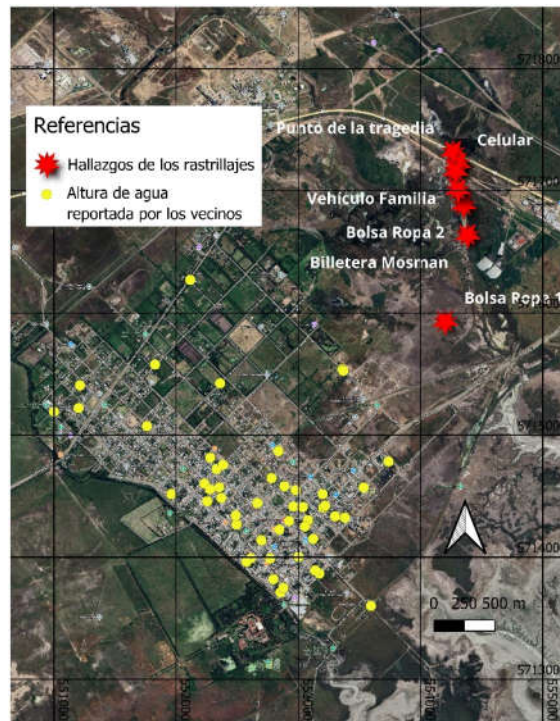


Figura 14. Estructuras hidráulicas presentes a lo largo del anillo del GDC que condicionan el ingreso de crecidas y mareas al casco urbano de GDC. Fuente: Fernández y Pérez (2024).

**Tabla 2. Nomenclatura, descripción y ubicación de las estructuras hidráulicas presentes a lo largo del anillo de GDC.**

Nombre	Descripción	Latitud (Sur)	Longitud (Oeste)
PC1	Puente en RN3 sobre Ao. Saladillo de García	38°41'17.66"	62°23'19.75"
PF1	Puente en Ramal Línea Roca (a Neuquén) sobre Ao. Saladillo de García	38°41'19.70"	62°23'19.35"
PC2	Puente en RN3 sobre Ao. Dulce	38°41'27.68"	62°22'33.98"
PF2	Puente en Ramal Línea Roca (a Neuquén) sobre Ao. Dulce	38°41'30.77"	62°22'35.82"
PC3	Puente en Joaquín V. González sobre Ao. Saladillo de García y Dulce	38°42'22.02"	62°22'11.07"
PF3	Puente en Ramal Línea Roca (a Patagones) sobre Ao. Saladillo de García y Ao. Dulce	38°42'27.38"	62°22'8.85"
AF1	Alcantarilla en Ramal Línea Roca (a Patagones) sobre Canal Drenaje	38°43'17.81"	62°22'47.06"
PC4	Puente en Ruta de Acceso a Puerto Cuatrerros sobre Canal Cuatrerros	38°43'40.96"	62°23'13.73"
PF4	Puente en Ramal Línea Roca (a Patagones) sobre Canal Cuatrerros	38°43'40.01"	62°23'14.85"
PC5	Puente en Acceso al Club Sansinena Social y Deportivo (Avda. 9 de Julio) sobre Canal Cuatrerros	38°43'6.83"	62°24'1.57"
PP1	Puente Peatonal en Avda. 9 de Julio 241 sobre Canal Cuatrerros	38°43'2.48"	62°24'7.80"
PC6	Puente en Avda. Pernici sobre Canal Cuatrerros	38°42'50.52"	62°24'46.74"

Fuente: de Fernández et al. (2023).



**Figura 15. Mapa de los sitios en Cerri, donde se reportaron las máximas alturas de agua, por los vecinos, vía encuesta de redes sociales y hallazgos de los rastrillajes. Fuente: Elaboración propia en base a información de los afectados y rastrillajes.**

Para la validación de la simulación completa se hizo necesario iterar entre las condiciones de borde de las cuencas y el escurrimiento 2D del agua en el anillo de GDC. Los pasos seguidos para la validación final fueron: a) se estimó una solución de hidrogramas de crecida con HEC-HMS; b) los hidrogramas obtenidos en a) se introdujeron como condición de borde entrantes y se ejecuta la simulación en 2D del Anillo de GDC con HEC-RAS; c) Se comparan las profundidades simuladas con las observadas. En caso que el ajuste no fuera aceptable, se repite el proceso desde a) hasta lograr una coincidencia adecuada entre la simulación y la realidad, variando los CN y diversos parámetros de ajuste.

En forma indirecta se utilizan filmaciones de vehículos atrapados en la corriente, así como declaraciones judiciales con respecto a personas desaparecidas y resultados de los rastros realizados por las autoridades.

## RESULTADOS

### Resultados proporcionados por la simulación con HEC-HMS

El valor del parámetro CN es de 90 en todas las subcuencas, el cual es del orden de los medidos por Jaafar et al. (2019), quienes estiman CN globales a partir de imágenes satelitales. Para el área de estudio, los valores en condición húmeda se encuentran entre 85 y 95 (Figura 16).

Los valores alcanzados después del proceso iterativo para: abstracción inicial, almacenamiento inicial (canopy) y almacenamiento máximo (canopy), se exponen para cada subcuenca, respectivamente, en cada etiqueta de la Figura 17.

Con los datos recopilados e ingresados al HEC-HMS para cada una de las cuencas analizadas se obtuvieron los siguientes hidrogramas de las Figuras 18 a 20.

La Tabla 3 muestra el valor del área de aporte, el caudal pico, volumen escurrido y tiempo de llegada del pico de cada cuenca.

Las Figuras 18 y 19, muestran que los hidrogramas correspondientes a las cuencas de los arroyos

Saladillo de García y Dulce, tienen sus curvas ascendentes muy empinadas, de duración temporal relativamente menor que el hidrograma del río Sauce Chico (Figura 20).

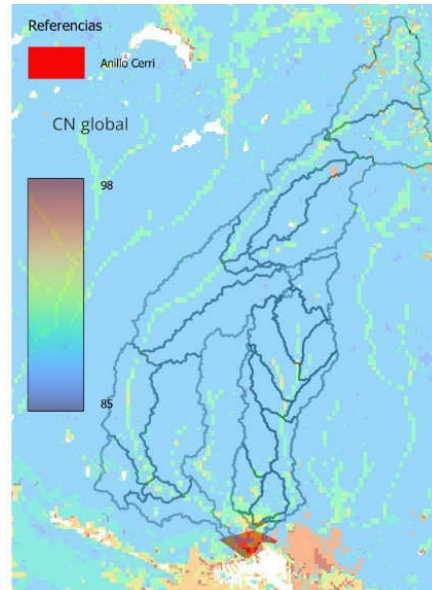


Figura 16. Valores globales de CN para la zona de estudio. Fuente. Elaboración propia en base a Jaafar et al. (2019).

Los valores del tiempo de pico de la crecida son muy similares alrededor de las 15:15 horas. Incluso para el arroyo Saladillo de García, que presenta un segundo pico aproximadamente a la 15:00 horas, con un valor de 872 m<sup>3</sup>/s (Figura 17). Esta concordancia, se debe a que la principal caída de agua se registró en la zona cercana a GDC, correspondientes a las cuencas bajas.

Los tiempos de llegada del pico de la crecida corresponde aproximadamente a 8 horas, ya que a las 5:00 horas, se registra el comienzo de la precipitación causante de la inundación. Este es el margen de acción que estas cuencas presentan y deben ser considerados al diseñar medidas de urgencia para proteger a la población.

### Resultados proporcionados por la simulación con HEC-RAS

Se seleccionan mapas con profundidad y velocidad de la zona de GDC desde las 8:30 hasta las 16:30 del 7 de marzo de 2025, en forma horaria (Figuras 21 a 29).

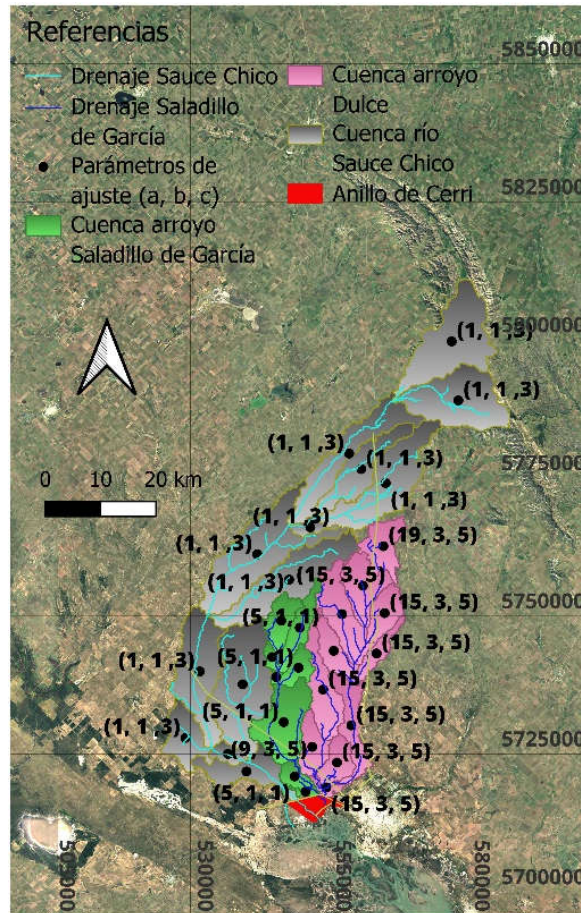


Figura 17. Valores de los parámetros de ajuste (abstracción inicial, almacenamiento inicial, almacenamiento máximo) respectivamente en mm en cada subcuenca etiquetada.

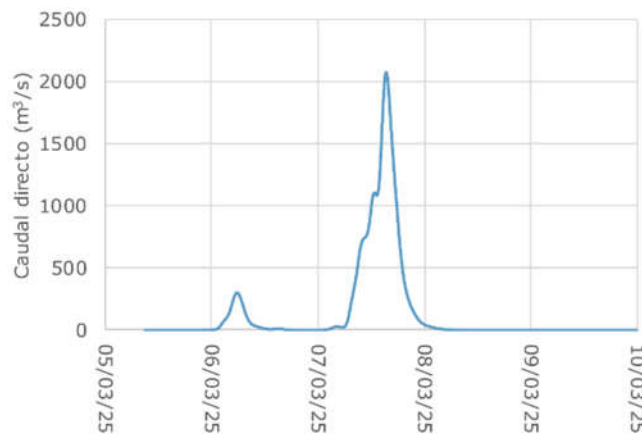


Figura 18. Hidrograma del arroyo Dulce, hasta la grilla de cálculo del HEC-RAS, sobre el anillo de GDC. Fuente: elaboración propia.

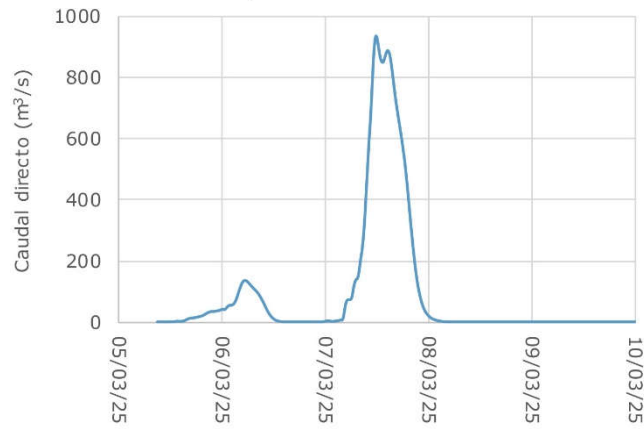


Figura 19. Hidrograma del arroyo Saladillo de García, hasta la grilla de cálculo del HEC-RAS, sobre el anillo de GDC. Fuente: elaboración propia.

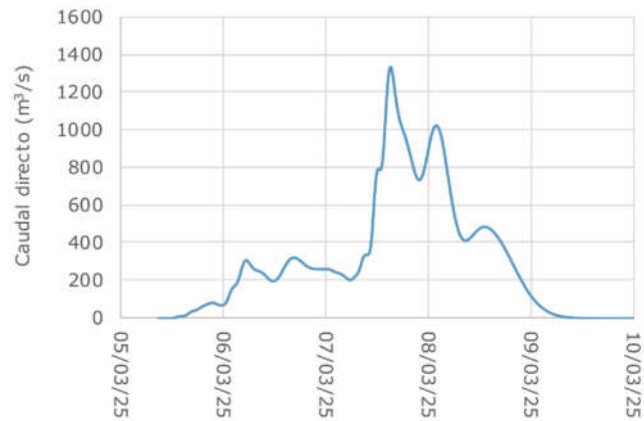


Figura 20. Hidrograma del río Sauce Chico, hasta la grilla de cálculo del HEC-RAS, sobre el anillo de GDC. Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Valores de área hasta el borde del anillo de GDC, Caudal pico, Fecha del pico y Volumen de agua escurrido simulados.

Cuenca de aporte	Área de aporte (km <sup>2</sup> )	Caudal Pico (m <sup>3</sup> /s)	Fecha del pico	Volumen de agua escurrido (1000*m <sup>3</sup> )
arroyo Dulce	558.9	2071.4	07/03/2025, 15:30	52993.3
arroyo Saladillo de García	256.2	932.6	07/03/2025, 11:45	35621.8
río Sauce Chico	1546.3	1332.8	07/03/2025, 15:15	122033.4

Fuente: elaboración propia.

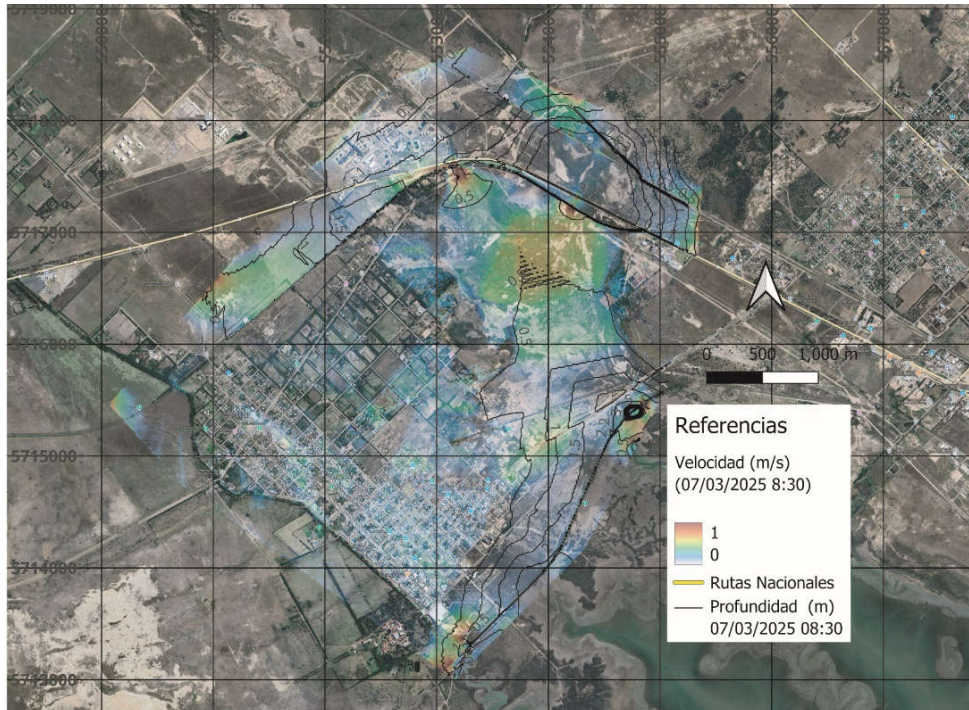


Figura 21. Profundidades y velocidades simuladas para las 8:30 del 7 de marzo de 2025. Fuente: elaboración propia.

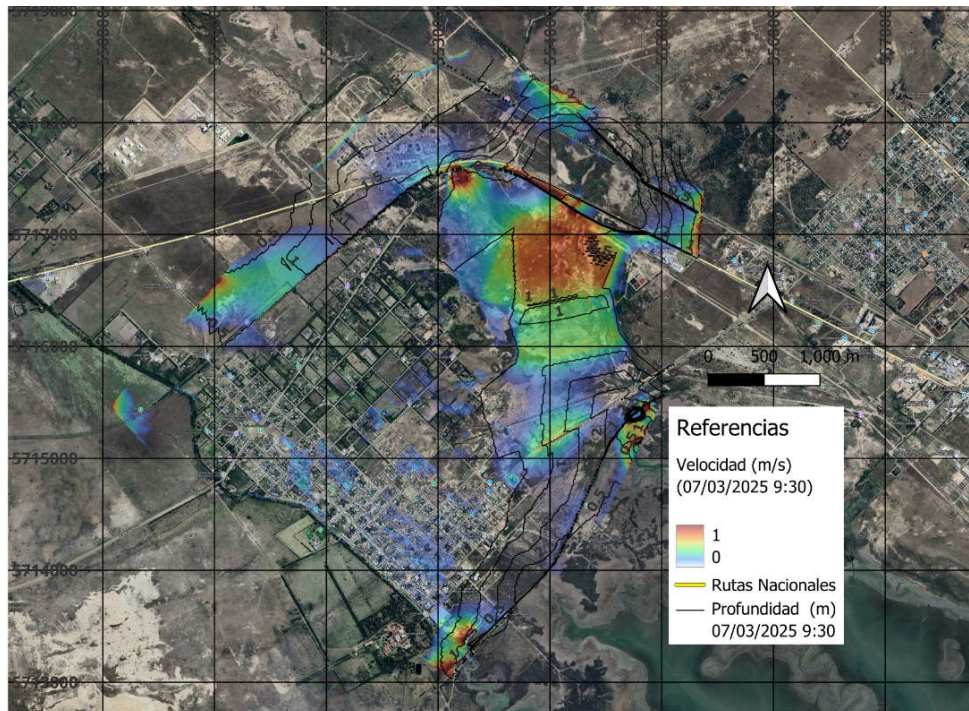


Figura 22. Profundidades y velocidades simuladas para las 9:30 del 7 de marzo de 2025. Fuente: elaboración propia.

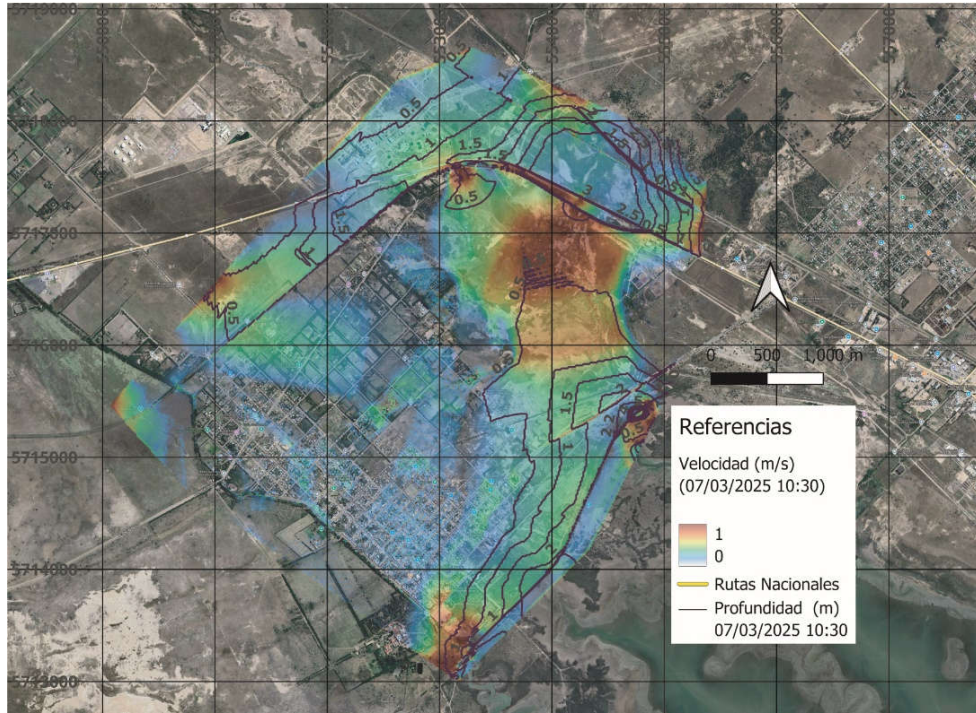


Figura 23. Profundidades y velocidades simuladas para las 10:30 del 7 de marzo de 2025. Fuente: elaboración propia.

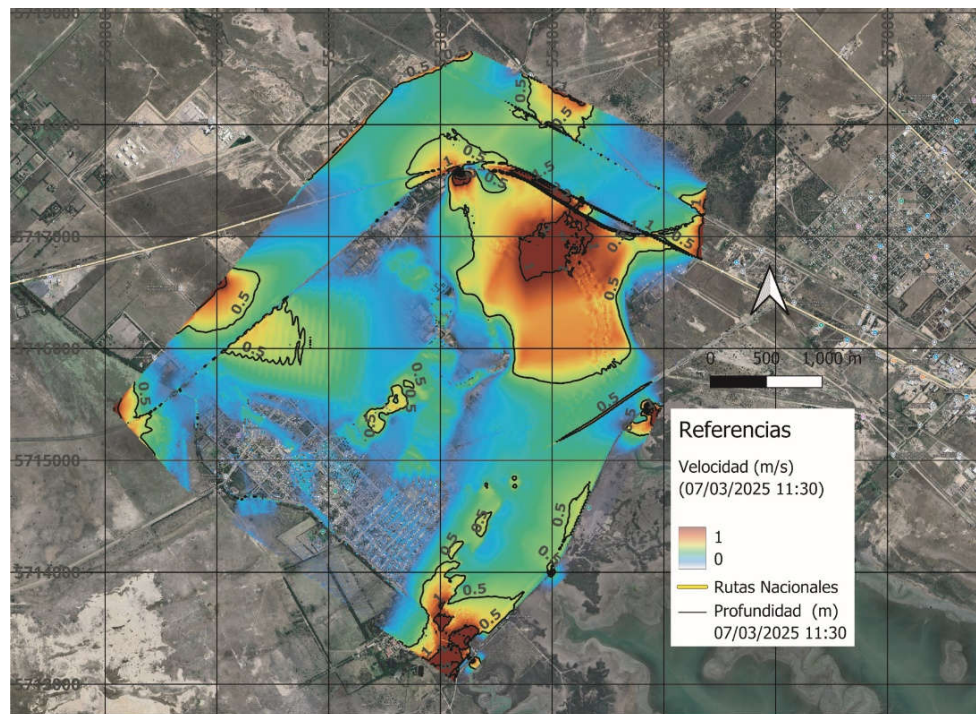


Figura 24. Profundidades y velocidades simuladas para las 11:30 del 7 de marzo de 2025. Fuente: elaboración propia.

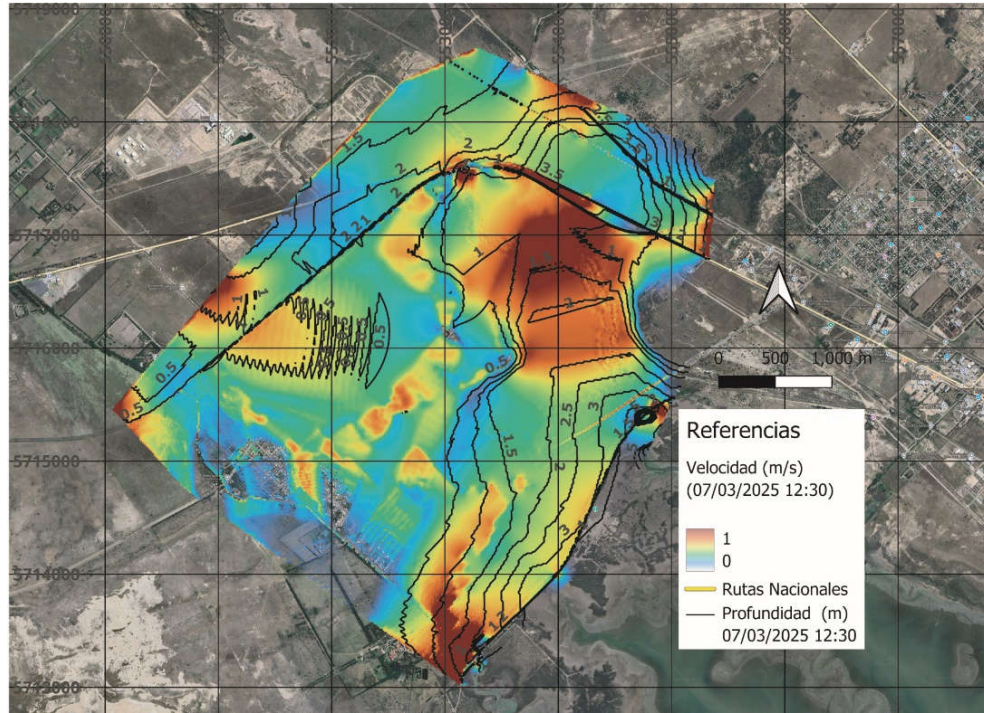


Figura 25. Profundidades y velocidades simuladas para las 12:30 del 7 de marzo de 2025. Fuente: elaboración propia.

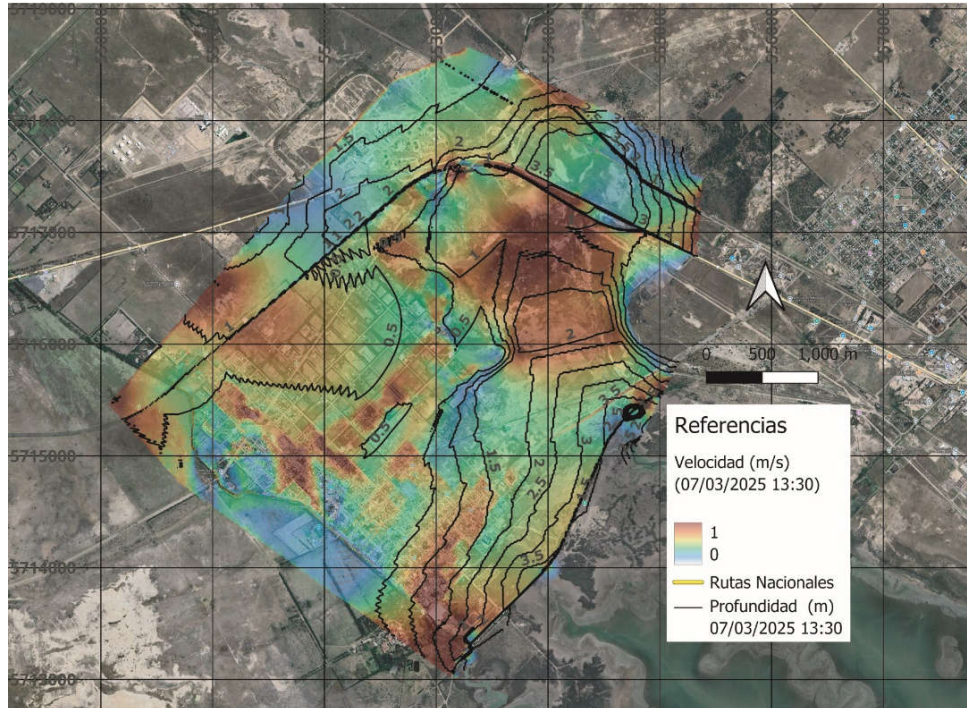


Figura 26. Profundidades y velocidades simuladas para las 13:30 del 7 de marzo de 2025. Fuente: elaboración propia.

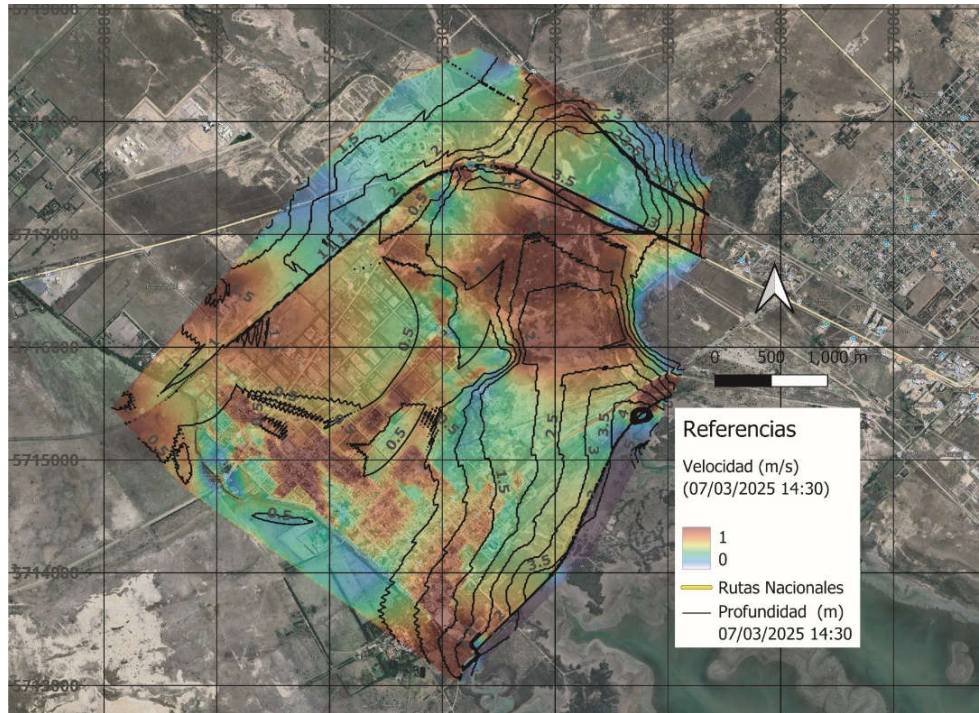


Figura 27. Profundidades y velocidades simuladas para las 14:30 del 7 de marzo de 2025. Fuente: elaboración propia.

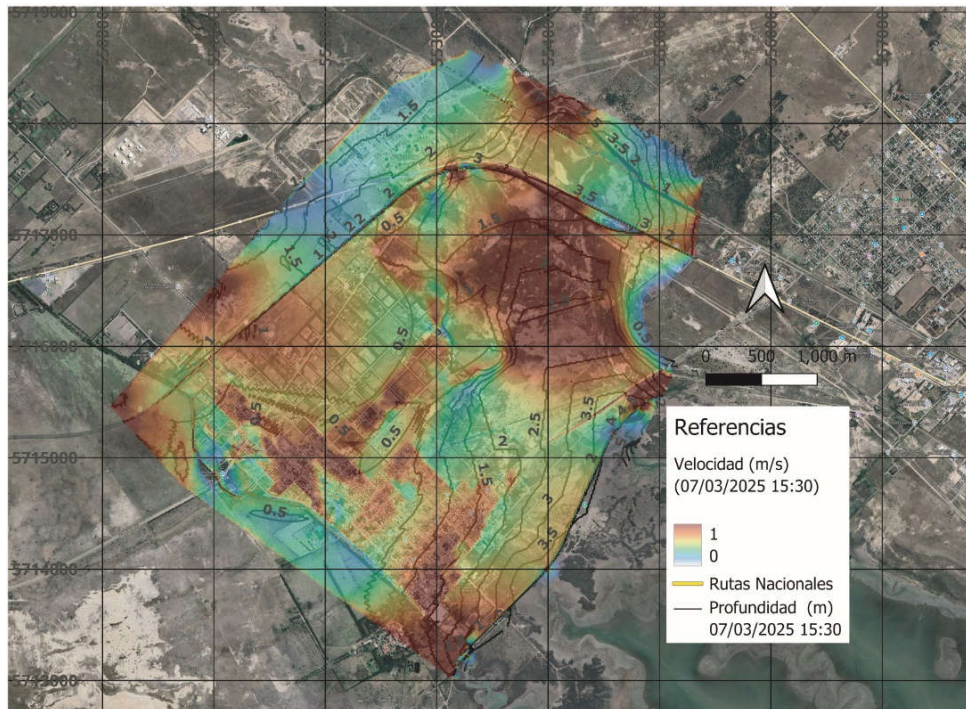


Figura 28. Profundidades y velocidades simuladas para las 15:30 del 7 de marzo de 2025. Fuente: elaboración propia.

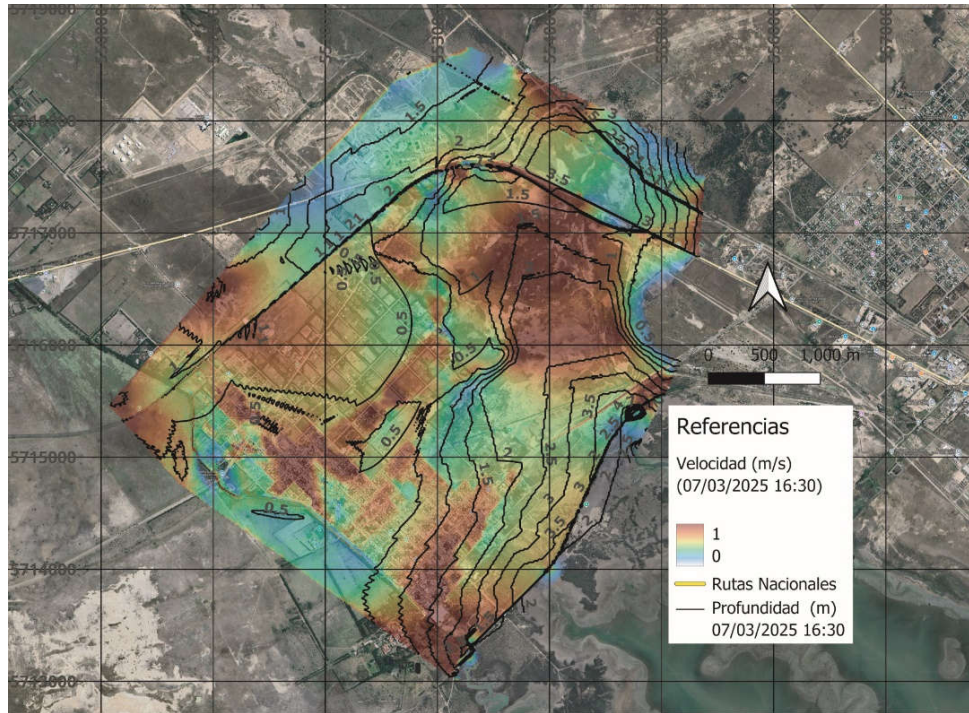


Figura 29. Profundidades y velocidades simuladas para las 16:30 del 7 de marzo de 2025. Fuente: elaboración propia.

De la secuencia de la Figuras 21 a 29, se observa que los terraplenes de la Ruta Nacional N°3 y viales, ejercen un efecto de protección al casco urbano. En las primeras horas, el agua es retenida al norte de los terraplenes, ingresando al anillo de GDC solo por los puentes. Cuando el pico de la crecida se acerca, los terraplenes se ven sobrepasados y grandes cantidades de agua ocupan la zona del casco urbano. Las Figuras 30 y 31 muestran las profundidades de agua simuladas sobre la cinta asfáltica de la Ruta Nacional

N°3 (RN3) y el terraplén Ferroviario de la Línea General Roca a Neuquén.

**Validación**

La máxima profundidad que el agua alcanzó en el casco urbano, registrada por los habitantes de GDC, se contrasta con los valores simulados en cada uno de los 52 puntos de observación reportados. La Figura 32 indica los valores de profundidad simulados vs. reportados.

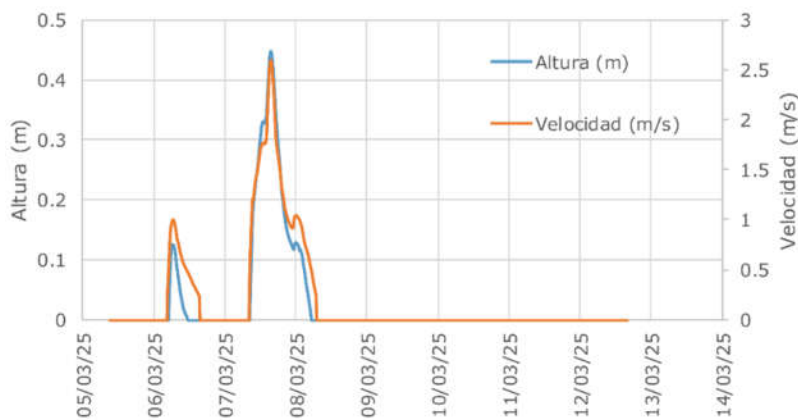


Figura 30. Altura y velocidad del agua sobrepasando la RN3 sobre el arroyo Dulce. Fuente: elaboración propia.

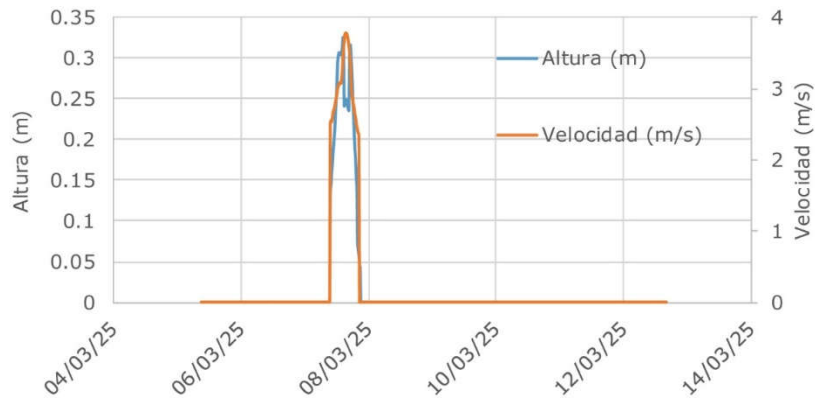


Figura 31. Altura y velocidad del agua sobrepasando el puente ferroviario de Línea General Roca a Neuquén sobre el arroyo Dulce. Fuente: elaboración propia.

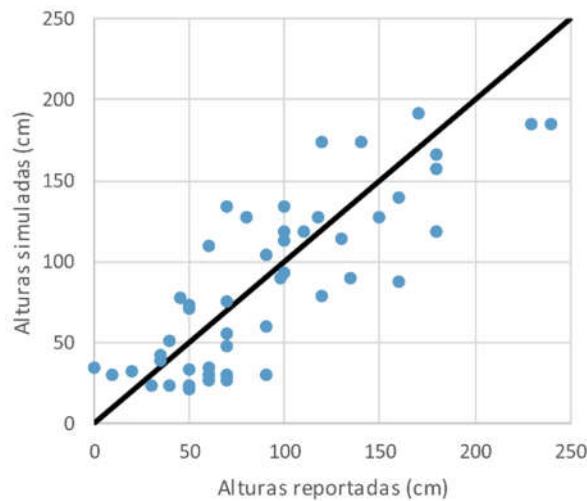


Figura 32. Representación de las alturas de agua en el casco urbano, alturas simuladas vs. reportadas por los habitantes. Fuente: elaboración propia.

Se puede observar en la Figura 32 que los valores se alinean muy bien con la recta a 45°, lo cual indica que el modelo explica la realidad satisfactoriamente.

Se aplica el índice de bondad de ajuste de Nash-Sutcliffe (1970), ecuación (2):

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (2)$$

donde E es el valor de índice de bondad de ajuste de Nash-Sutcliffe,  $O_i$  son los valores observados,  $P_i$  son los valores simulados y  $\bar{O}$  es el promedio de los valores observados. Valores de  $E = 1$  indican ajuste perfecto,  $E = 0$  marca un ajuste que no es mejor que el promedio de los valores,  $E < 1$  es un mal ajuste. Para este trabajo se usará el criterio de Molnar (2011) que

categoriza los valores de E en función de tipo de ajuste logrado (Tabla 4).

Tabla 4. Valores de eficiencia Nash-Sutcliffe y su relación con la bondad de ajuste según Molnar (2011).

Eficiencia Nash-Sutcliffe	Ajuste
< 0.2	Insuficiente
0.2 - 0.4	Satisfactorio
0.4 - 0.6	Bueno
0.6 - 0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

El valor obtenido del E para la simulación realizada es  $E = 0.65$ , lo que se corresponde con un ajuste muy bueno [según Molnar (2011), Tabla 4].

Junto a la validación obtenida, se verifica que el agua pasó por encima de la traza de los ferrocarriles y la Ruta Nacional N°3, con suficiente tirante y velocidad como para arrastrar un vehículo de la cinta asfáltica, lo cual fue constatado por los rastrellajes realizados después de la crecida.

Para completar el análisis de bondad de ajuste se implementó el error absoluto medio porcentual, ecuación (3):

$$Ea = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{h_o - h_s}{h_o} \right| \quad (3)$$

donde  $n$  es el número de observaciones,  $h_o$  es la profundidad reportada y  $h_s$  la profundidad simulada.

Para el caso presente se verifica un  $Ea = 0.38$ . Este valor es relativamente alto, debiéndose a la falta de precisión en el modelo de terreno y la dispersión de los datos observados. Sin embargo, se halló el coeficiente de asimetría de la distribución de los errores, arrojando un valor de 0.04. Esto evidencia que el sesgo es muy bajo (menor al 5%), aunque con una gran dispersión.

## DISCUSIÓN

Los softwares HEC-HMS y HEC-RAS acoplados, permiten describir la circulación y niveles de agua alcanzados durante la crecida en la zona del Anillo de GDC. La validación final otorga peso a los valores de caudal pico, hora del pico y volumen de agua escurrido calculados con HEC-HMS. De esta manera, todos estos valores tienen la relevancia de una validación exitosa para un evento de crecida estudiado.

Se destaca la utilidad de las redes sociales para obtener información susceptible de ser usada para la validación. En este caso 64 informes fueron recibidos y se usaron efectivamente 52 después de la depuración de la lista. Esta novedosa manera de recabar información resulta práctica y útil para estos casos, donde los datos de aforo son inexistentes o no están disponibles. La sistematización de obtención de datos por medio de los vecinos, puede ser una estrategia muy efectiva.

La simulación presentada en este trabajo resulta un avance en el desarrollo de herramientas hidrológicas para la toma de decisiones, respecto al presentado por Fernández y Pérez (2024), ya que, en esta oportunidad, se logra validar exitosamente el modelo

hidrológico e hidráulico para la zona de GDC. Si bien el antecedente se enfoca en la peligrosidad que las mareas eólicas extraordinarias tienen en GDC, los resultados para la tormenta de 50 años de recurrencia, en las que no se produjo sobrepaso de terraplenes, se muestran consistentes con los del comienzo de la tormenta estudiada. Luego, las profundidades y velocidades simuladas, se ven ampliamente superadas y se verifica el sobrepaso de los terraplenes carreteros y ferroviarios, siendo esto señal de la magnitud del evento.

El modelo validado es susceptible de ser mejorado. El modelo de terreno usado, presenta carencias, las cuales se podrían subsanar a partir de conseguir mejores datos topográficos de la zona del Anillo de Cerri, especialmente de la zona urbana. La información requerida, o bien no existe o no está disponible. Por otro lado, la magnitud del evento ocasionó un volumen escurrido mucho mayor al volumen disponible para el almacenamiento en la zona urbana, pudiendo entonces asumirse que la capacidad de almacenamiento fuera de segundo orden.

Algunos de los terraplenes y varios puentes se vieron seriamente dañados e incluso derribados por la crecida del 5 al 8 de marzo de 2025, lo cual implica variaciones en el modelo de terreno el cual queda desactualizado, de cara a los próximos eventos. En caso de preverse medidas estructurales, sería necesario revisar, actualizar, modificar y abarcar un área de simulación más extensa y a zonas fuera del anillo de GDC, también han sufrido las consecuencias del desastre, pero quedaron fuera de la presente simulación.

En el caso de medidas no estructurales, la alta participación de los vecinos, generó la mejora sustancial de la herramienta hidrológico-hidráulica que aún se encuentra en desarrollo. Es por ello que sería muy efectivo apoyar el compromiso de los damnificados, que permitan mejorar las herramientas y mitigar los efectos de los eventos extraordinarios como el del 7 de marzo de 2025.

## CONCLUSIONES

Los objetivos planteados en el trabajo fueron alcanzados. Se logró implementar el HEC-HMS exitosamente, para la tormenta del 5 al 8 de marzo de 2025. Se determinaron los caudales pico, la hora de arribo del mismo, el volumen escurrido y el

hidrograma de cada uno de los cursos de agua estudiados.

Se logra implementar el HEC-RAS en el anillo de GDC para el evento del 5 al 8 de marzo de 2025, lográndose validar los resultados simulados por medio de más de 52 datos obtenidos en el campo y reportados por medio de redes sociales.

Se logró avanzar con la modelación hidrológica e hidráulica de la zona, ya que a diferencia de Fernández y Pérez (2024), se validó la simulación, lo cual ciertamente representa un avance sustancial.

### AGRADECIMIENTOS

El presente estudio fue financiado por la Secretaría General de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional del Sur (UNS) con fondos correspondientes al proyecto de investigación “Cuencas del sur de la región pampeana. Hidrología, calidad y modelización de los recursos hídricos. Fase III”.

Los autores agradecen la participación de las estudiantes de Ingeniería Civil Catalina Baigorri y Agustina Manganeli por su aporte al trabajo.

Un agradecimiento especial a la población de General Daniel Cerri que, a pesar de haber sido duramente golpeados por la crecida, brindaron desinteresadamente información vital para la validación del modelo propuesto.

### REFERENCIAS

Arcement, G. J. y Schneider, V. R. (1989). Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for natural channels and flood plains. *United States Geological Survey Water Supply Paper*, 2339, v, 38 p. <https://doi.org/10.3133/wsp2339>

Bolsa de Cereales y Productos de Bahía Blanca (2025). *Red de Estaciones Meteorológicas*. <https://info.bcp.org.ar/Estaciones/InfoG.asp?pagina=MapaG.asp?CalcPrecip=S>

Chow, V. T., Maidment, D. R., y Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogotá: Editorial McGraw Hill Interamericana, 584 p. [https://www.academia.edu/105588091/Ven\\_Te\\_C\\_how\\_Hidrologia\\_Aplicada](https://www.academia.edu/105588091/Ven_Te_C_how_Hidrologia_Aplicada)

Consorcio de Gestión del Puerto de Bahía Blanca. (s.f.). Datos históricos de niveles de marea en Ingeniero White, Puerto Galván y Puerto Belgrano.

Puerto de Bahía Blanca, VTS Online. <https://puertobahiablanca.com/vts-online.html>

Fernández, S., Sequeira, M., Espósito, M. y Paoloni, J. (2015). Estudio del comportamiento fluviométrico e hidrológico superficial de una cuenca del sur de la Región Pampeana con datos limnigráficos diarios instantáneos: Caracterización hídrica para los fines del riego. *Cuadernos del Curiham*, 21, 41–54. <https://doi.org/10.35305/curiham.v21i0.20>

Fernández, S. N., Pérez, D. E., Brandizi, L. D., Serralunga, M., Weis, C. F. y Abalo, P. O. (2019). Avances en la modelación del escurrimiento superficial de una cuenca del sudoeste bonaerense. Caso de estudio: Sector Superior Cuenca Alta del Río Sauce Grande (Argentina). *Revista Universitaria de Geografía*, 28 (2), 11-32. <https://revistas.uns.edu.ar/rug/article/view/4193>

Fernández, S. N., Pérez, D. E., Weis, C. F., Flores, M. A., y Abalo, P. O. (2021). Validación de simulaciones de tormentas en el Sector Superior de la Cuenca Alta del Río Sauce Grande (Argentina). *Revista Universitaria de Geografía*, 30(1), 43–76. <https://revistas.uns.edu.ar/rug/article/view/4024>

Fernández, S. N., Pérez, D. E., Weis, C. F., y Flores, M. A. (2022). Calibración de simulaciones de crecidas de la cuenca alta del río Sauce Grande, provincia de Buenos Aires, Argentina. *Cuadernos del Curiham*, 28, 25-42. <https://doi.org/10.35305/curiham.v28i.179>

Fernández, S. N., Pérez, D. E., Flores, M. A. y Abalo, P. O. (2023). Análisis de los factores de peligrosidad ante eventos de inundación de la ciudad de General Daniel Cerri (Buenos Aires, Argentina). *Revista Universitaria de Geografía*, 32(2), 162–184. <https://revistas.uns.edu.ar/rug/article/view/4656>

Fernández, S. N. y Pérez, D. E. (2024). Análisis de la peligrosidad por inundación en una zona de planicie afectada por mareas. Caso de estudio: localidad de General Daniel Cerri, Buenos Aires, Argentina. *Geográfica Digital*, 20(40), 91–110. <https://doi.org/10.30972/geo.20407205>

Gil, V. (2009). Hidrogeomorfología de la cuenca alta del río Sauce Grande aplicada al peligro de crecidas. [Tesis doctoral]. Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur. <https://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/2069>

González, M. A. (2018). Hidrogeomorfología de la cuenca del arroyo del Saladillo de García aplicada al ordenamiento del periurbano de Bahía Blanca [Tesis de grado]. Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur.

- <https://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/5773>
- Hydrologic Engineering Center (2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical Reference Manual*. California: U. S. Army Corps of Engineers. Institute of Water Resources. [https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS\\_Technical%20Reference%20Manual\\_\(CPD-74B\).pdf](https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Technical%20Reference%20Manual_(CPD-74B).pdf)
- Hydrologic Engineering Center (2016). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS. User's Manual, Version 4.2*. California: U. S. Army Corps of Engineers. Institute of Water Resources. [https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS\\_Users\\_Manual\\_4.2.pdf](https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Users_Manual_4.2.pdf)
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (2022). Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas. Argentina. INDEC. <https://www.indec.gov.ar/indec/web/Nivel4-Tema-2-41-165>
- Jaafar, H. H., Ahmad, F. A. y El Beyrouthy, N. (2019). GCN250, new global gridded curve numbers for hydrologic modeling and design. *Scientific Data*, 6(145). <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0155-x>
- Linsley, R. K., Kohler, M. A. y Paulus, J. L. H. (1986). *Hidrología para Ingenieros*. Ciudad de México: McGraw-Hill. [https://www.academia.edu/37765494/Hidrolog%C3%ADa\\_para\\_Ingenieros\\_LINSLEY\\_KOHLER\\_y\\_PAULHUS](https://www.academia.edu/37765494/Hidrolog%C3%ADa_para_Ingenieros_LINSLEY_KOHLER_y_PAULHUS)
- Molnar, P. (2011). *Calibration. Watershed Modelling, SS 2011*. Institute of Environmental Engineering. ETH Zürich, Zürich, Switzerland.
- Nash, J. E. y Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10(3), 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Perillo, G. M. E. y Piccolo, M. C. (1991). Tidal response in the Bahía Blanca estuary, Argentina. *Journal of Coastal Research*, 7(2), 437-449. [https://www.researchgate.net/publication/279901397\\_Tidal\\_response\\_in\\_the\\_Bahia\\_Blanca\\_estuary\\_Argentina](https://www.researchgate.net/publication/279901397_Tidal_response_in_the_Bahia_Blanca_estuary_Argentina)
- Perillo, G. M. E., Piccolo, M. C., Arango, J. M. y Sequeira, M. E. (1987). Hidrografía y circulación del estuario de Bahía Blanca (Argentina) en condiciones de baja descarga. *Proceeding 2o Congreso Latinoamericano sobre Ciencias del Mar*, II, 95-104. [https://www.researchgate.net/profile/Gerardo-Perillo/publication/284682416\\_Hidrografia\\_y\\_circulacion\\_del\\_estuario\\_de\\_Bahia\\_Blanca\\_Argentina\\_en\\_condiciones\\_de\\_baja\\_descarga/links/56ba425708ae6a0040ade5b2/Hidrografia-y-circulacion-del-estuario-de-Bahia-Blanca-Argentina-en-condiciones-de-baja-descarga.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Gerardo-Perillo/publication/284682416_Hidrografia_y_circulacion_del_estuario_de_Bahia_Blanca_Argentina_en_condiciones_de_baja_descarga/links/56ba425708ae6a0040ade5b2/Hidrografia-y-circulacion-del-estuario-de-Bahia-Blanca-Argentina-en-condiciones-de-baja-descarga.pdf)
- Servicio Meteorológico Nacional (2025). *Informe especial del evento meteorológico 04-08 de marzo de 2025* [Informe técnico]. Servicio Meteorológico Nacional, Argentina. [https://www.smn.gov.ar/sites/default/files/Informe\\_Bahia%20Blanca\\_SMN\\_marzo\\_2025.pdf](https://www.smn.gov.ar/sites/default/files/Informe_Bahia%20Blanca_SMN_marzo_2025.pdf)
- Spagnolo, S. (2011). Gestión Ambiental del Desarrollo Urbano. Estudio de caso: localidad de General Daniel Cerri. *Huellas*, 15, 180-197. Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur. <https://repo.unlpam.edu.ar/server/api/core/bitstreams/9f4108da-c2f9-4ee8-a7f5-44e02c7e39fa/content>
- Torrero, M. P. (2009). Río Sauce Chico: Estudio Hidrográfico para un desarrollo sustentable [Tesis Doctoral]. Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur. <http://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/1978>
- United States Army Corps of Engineers (2020). *HEC-RAS Mapper User's Manual*. US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdoc/s/rmum/6.2/introduction>
- United States Army Corps of Engineers (2021). *HEC-RAS 2D User's Manual*. US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdoc/s/r2dum/6.2/introduction/hec-ras-2d-modeling-advantages-capabilities>

**Tipo de Publicación: ARTÍCULO.**

*Trabajo recibido el 07/08/2025, aprobado para su publicación el 20/11/2025 y publicado el 11/12/2025.*

**COMO CITAR**

Fernández, S. N. y Pérez, D. E. (2025). Validación con información generada por los afectados, de una simulación hidrológica-hidráulica de la inundación extraordinaria del 7 de marzo de 2025 en General Daniel Cerri, Buenos Aires, Argentina. *Cuadernos del CURIHAM*, 31, e10. <https://doi.org/10.35305/curiham.v31.e10>

## ROLES DE AUTORÍA

SNF y DEP realizaron el proceso de investigación, recopilación de datos, análisis, conceptualización, prepararon y redactaron el presente trabajo. Ambos aprobaron la versión para ser publicada y son capaces de responder a todos los aspectos del manuscrito.

## LICENCIA

*Este es un artículo de acceso abierto bajo licencia: Creative Commons Atribución -No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>)*

