

Herramientas para la comprensión de la dinámica de la inundación del 7 de marzo de 2025 en Bahía Blanca

Versión 1.0

INFORME TÉCNICO

Informe LH 01-423-25
ABRIL 2025



AUTORIDADES DEL INA

PRESIDENTE (a cargo)

Lic. Bernardo Bartolomé HEREDIA

GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS

Ing. Fernando José ZÁRATE

SUBGERENTE DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA

Dr. Ing. Pablo Ezequiel GARCÍA

EQUIPO DE TRABAJO

Ing. Santiago ARRIGONI

Dr. Ing. Pablo Ezequiel GARCÍA

Rene HERRERO DUCLOUX

María Catalina LAGO

Lic. Nicolás ORTIZ

Ing. Martín SABAROTS GERBEC

Ing. Pablo SPALLETII

Inga. Constanza FERNÁNDEZ GOROSTIDI

Ing. Santiago GUIZZARDI

Ing. Leandro KAZIMIERSKI

Inga. Marina LAGOS

Ing. Mag. Mariano RE

Inga. Marina SARTI

INFORME PRODUCIDO POR:

Ing. Leandro David KAZIMIERSKI

Ing. Mg. Mariano RE

Ing. Martín SABAROTS GERBEC

Lic. Nicolás ORTIZ

Inga. Marina LAGOS

Ing. Santiago ARRIGONI



Herramientas para la comprensión de la dinámica de la inundación de Bahía Blanca del 7 de marzo de 2025

RESUMEN

El evento de inundación ocurrido el 7 de marzo de 2025 en Bahía Blanca representa un desafío significativo para la gestión del riesgo de inundaciones en contextos urbanos. Desde el Laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua (INA), durante los últimos años, se ha impulsado una línea estratégica orientada a comprender y mitigar el impacto de precipitaciones extremas en ciudades argentinas. Bajo el enfoque integral desarrollado, que aborda las distintas etapas del riesgo de inundación —antes, durante y después del evento—, se ha combinado la modelación numérica, la ciencia de datos, el sensoramiento hidrológico y la ciencia ciudadana para realizar un aporte a la comprensión de este fenómeno ocurrido. En este informe se presenta la contribución del Laboratorio de Hidráulica del INA que involucra la libre disponibilidad de una serie de herramientas desarrolladas en un tiempo muy acotado. Este aporte consiste en un modelo hidrodinámico 2D de las cuencas del entorno de la ciudad de Bahía Blanca, un registro georreferenciado de marcas de inundación máxima recopiladas desde redes sociales, y estimaciones de velocidad de escurrimiento mediante velocimetría por imágenes. Estos recursos compartidos están orientados a fortalecer una perspectiva colaborativa y abierta del conocimiento para una mejor gestión de las inundaciones urbanas.

Descriptores temáticos: precipitación extraordinaria - inundación urbana – modelación numérica – ciencia ciudadana – velocimetría por imágenes

Descriptores geográficos: Bahía Blanca - General Cerri – Ingeniero White – arroyo Napostá – canal Maldonado – arroyo Sauce Chico – provincia de Buenos Aires

Índice

I.	INTRODUCCIÓN	5
II.	INFORMACIÓN DE BASE	7
2.1.	Definición del sistema hídrico	7
2.2.	Modelo Digital del Terreno.....	11
2.3.	Información pluviométrica	15
2.4.	Nivel de marea.....	17
2.5.	Uso del suelo.....	18
III.	OBSERVACIONES INDIRECTAS.....	20
3.1.	Marcas de altura máxima de inundación	20
3.2.	Hidrogramas estimados	22
3.3.	Estimación de velocidades.....	25
IV.	MODELO HIDRODINÁMICO	31
4.1.	Software	31
4.2.	Implementación del modelo.....	32
4.3.	Proceso de calibración/validación.....	38
4.4.	Resultados preliminares	42
V.	CONCLUSIONES.....	45
VI.	REFERENCIAS.....	47
VII.	ANEXO I	48

1. INTRODUCCIÓN

El evento de inundación ocurrido en Bahía Blanca el viernes 7 de marzo de 2025 plantea una serie de desafíos a la gestión del riesgo de inundaciones. Desde la hidrología y la hidráulica se pueden aportar miradas hacia una comprensión integral del problema y una búsqueda con múltiples aristas en el marco de la mitigación de los impactos.

El Laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua cuenta con una historia de más de cinco décadas abordando problemáticas relevantes para el desarrollo del país. Hoy los grandes centros urbanos de la Argentina experimentan diversos problemas asociados a la hidráulica urbana y las inundaciones debido a la ocurrencia de precipitaciones extremas, situaciones que requieren de un fuerte compromiso e involucramiento institucional.

Luego de la inundación de La Plata en abril de 2013, en este Laboratorio se estableció una línea estratégica de trabajo cuyo objetivo principal ha sido el de estudiar detalladamente el impacto de precipitaciones extremas en cuencas urbanas. Esta línea pretende aportar en la comprensión de este tipo de problemática contribuyendo a una mejor gestión del riesgo de inundación, diferenciando las instancias del antes, durante y después de la inundación.

En este caso, los aportes al entendimiento de la dinámica del agua en estos sistemas urbanos se basan en la modelación numérica asociada a otras herramientas como la ciencia de datos, el sensoramiento de variables hidrológicas (hidrometría) y la ciencia ciudadana. Este enfoque se constituye en marco del paradigma de la hidroinformática aplicada al análisis de las inundaciones urbanas.

Las intensas precipitaciones registradas en la madrugada y la mañana del 7 de marzo de 2025 en la ciudad de Bahía Blanca fueron consecuencia de un evento meteorológico que comenzó a gestarse varios días antes (SMN, 2025). Este evento produjo precipitaciones muy intensas, principalmente sobre el sudoeste de la provincia de Buenos Aires, donde la ciudad de Bahía Blanca fue una de las más afectadas. Como consecuencia del impacto de la inundación, al momento se reportaron 16 personas fallecidas. Además, se evacuaron más de 1000 personas y se produjeron cuantiosos daños materiales.

Ante la inundación de Bahía Blanca, desde el Laboratorio de Hidráulica del INA, se pretende sumar y compartir herramientas que fueron implementadas en un tiempo muy acotado gracias a la experiencia acumulada en los últimos años. Estos instrumentos que se facilitan pueden ser utilizados y mejorados por quienes desde la comunidad hidrológica e hidráulica puedan sumar en una misma línea inclusiva y democratizante del conocimiento.

El aporte que desde el Laboratorio de Hidráulica del INA se presenta en este informe se traduce en la disponibilidad de herramientas que, además de ser mejorables desde una perspectiva colaborativa, pueden ser utilizadas para la comprensión e interpretación de la dinámica de este evento de inundación. Las vías de descarga de estas herramientas serían el Repositorio Institucional del INA (RINA), la propia web del INA y la cuenta en GitHub del Laboratorio de Hidráulica. Los principales elementos que se ponen a disposición son: un modelo hidrodinámico

INUNDACIÓN DE BAHÍA BLANCA – 7 de marzo de 2025

bidimensional (2D) de las cuencas del sistema hídrico de Bahía Blanca, un registro georreferenciado de marcas de inundación máxima en la región de mayor impacto obtenidas en redes sociales, y la estimación de velocidades en cauces mediante la utilización de velocimetría por imágenes.

2. INFORMACIÓN DE BASE

2.1. Definición del sistema hídrico

2.1.1. Cuencas

El sistema hídrico de la ciudad de Bahía Blanca, Ingeniero White y General Cerri, las zonas más afectadas por el evento del 7 de marzo de 2025, se compone de dos grandes cursos de agua naturales: el arroyo Napostá ubicado en el sector este y el arroyo Sauce Chico en el sector oeste. Entre medio de estas cuencas se encuentran otros dos cursos menores, pero de importancia para la región: los arroyos Salado de García y Saladillo. Las cuencas de aporte a estos cursos de agua se definieron a través del Modelo Digital de Elevación MERIT que se describe en mayor detalle en el siguiente ítem (Figura 2.1).

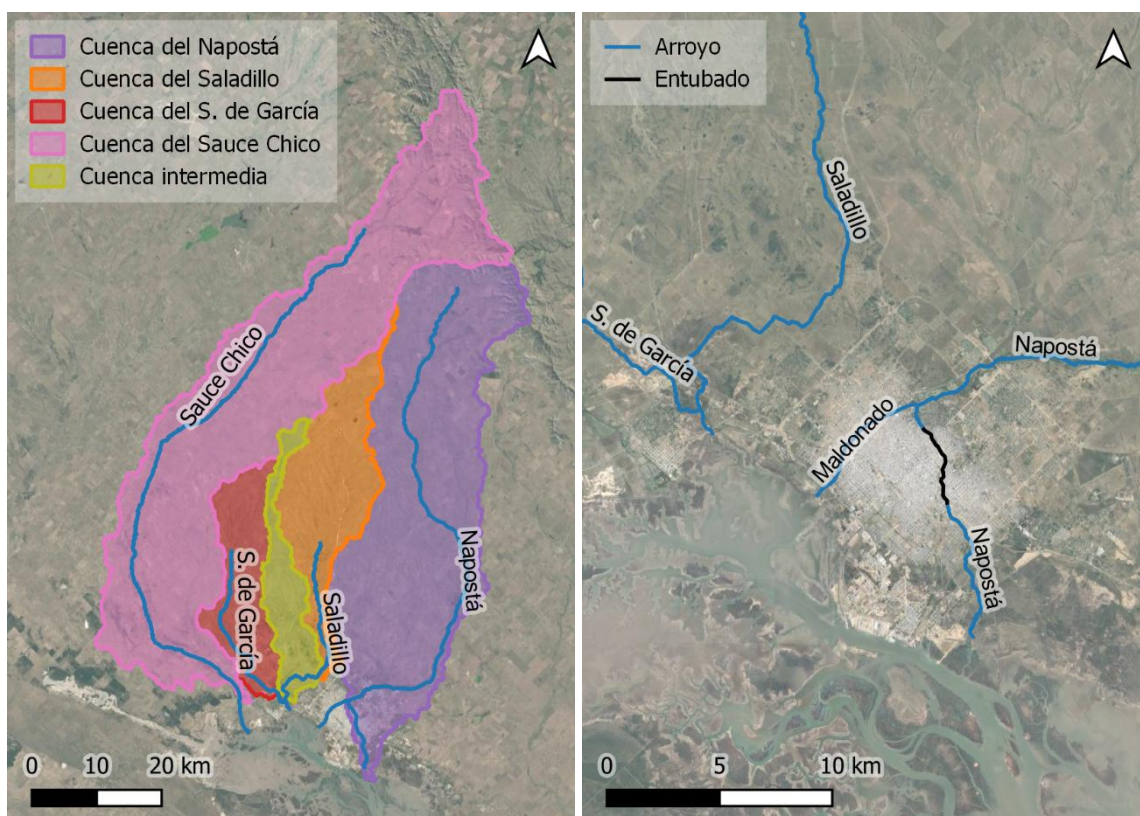


Figura 2.1. Cuencas y arroyos principales de la zona urbanizada de Bahía Blanca.

2.1.2. Red hídrica

La definición de la red hídrica de las cuencas del entorno de Bahía Blanca se realizó a partir de la localización de los principales cursos de agua del sistema: Canal Maldonado y arroyos Sauce Chico, Saladillo de García, Saladillo y Napostá. Estos cinco cursos de agua se digitalizaron con gran

detalle siguiendo su ubicación mediante el uso de imágenes satelitales (Figura 2.1). No se consideraron, en esta instancia, conducciones menores como los canales del sudeste de la ciudad o los conductos pluviales de la ciudad.

Dada la emergencia y la no disponibilidad de información detallada, para la definición de la geometría de cada uno de los cauces de la red hídrica de Bahía Blanca se requirió de una estrategia de simplificación de su geometría.

En este marco y a modo de ilustración, se presenta el caso del arroyo Napostá. De igual manera se definieron el resto de los cauces. En este caso se analizaron tres secciones características a partir de la estimación de dimensiones basada en *Google Earth* y en fotografías de la zona: una sección triangular (prolongando los taludes hacia el centro del cauce) y dos secciones trapezoidales de diferente altura (Figura 2.2).

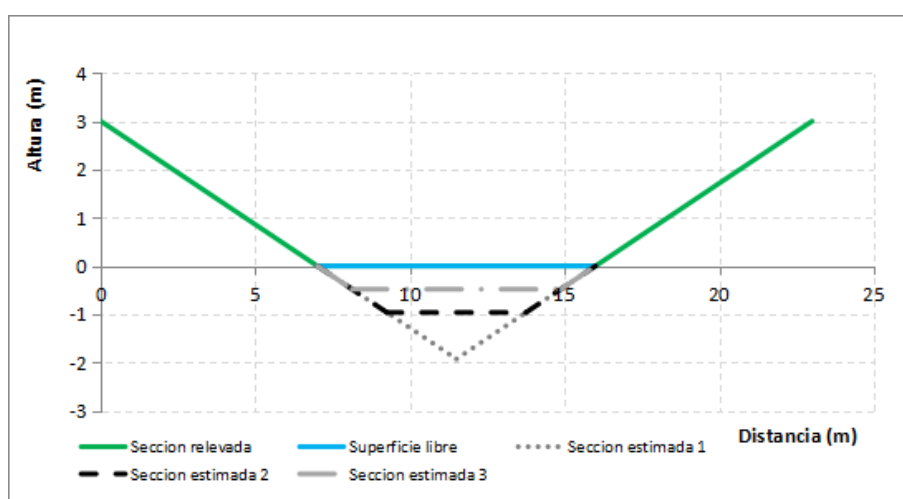


Figura 2.2. Tres propuestas de caracterización simplificada de la geometría del arroyo Napostá.

Para cada uno de estos tipos de sección se realizó un cálculo de sensibilidad hidráulica basado en la formulación de Chezy-Manning para definir la geometría de los cauces del sistema para la modelación (Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Sensibilidad hidráulica de tres tipos de secciones simplificadas del arroyo Napostá.

Variable / Sección	Triangular (1)	Trapezoidal (2)	Trapezoidal (3)
n de Manning	0.025	0.025	0.025
Pendiente media [m/m]	0.03	0.03	0.03
Área [m ²]	8.0	7.5	6.0
Perímetro mojado [m]	4.5	7.7	6.5
Radio hidráulico [m]	1.8	1.0	0.9
Caudal [m ³ /s]	81.7	51.0	39.5

La sección triangular resulta la de mayor capacidad, por encima de las dos secciones trapeciales presentadas. A partir de estos resultados, se definió como sección de referencia a la Trapezial (2) dado que su caudal es consistente con el de diseño del tramo entubado de este arroyo.

2.1.3. Obras hidráulicas

En Bahía Blanca y su entorno se encuentran una serie de intervenciones sobre los cauces que resultan importantes para la comprensión de la dinámica del agua. Algunas de estas obras resultan determinantes, sobre todo por la influencia que tienen en la zona urbanizada. A continuación, se comentan las principales obras, entre las que se destacan los puentes, el Canal Maldonado, el entubado del arroyo Napostá y el partidor de flujos entre estos dos últimos:

Puentes

Sobre los cuatro cauces estudiados en este trabajo, y en toda la extensión de sus cuencas, se contabiliza la totalidad de 160 puentes. Sus funciones son diferentes, ya que corresponden principalmente a cruces peatonales, de calles o de ferrocarril. En la Figura 2.3 se presentan sus ubicaciones.

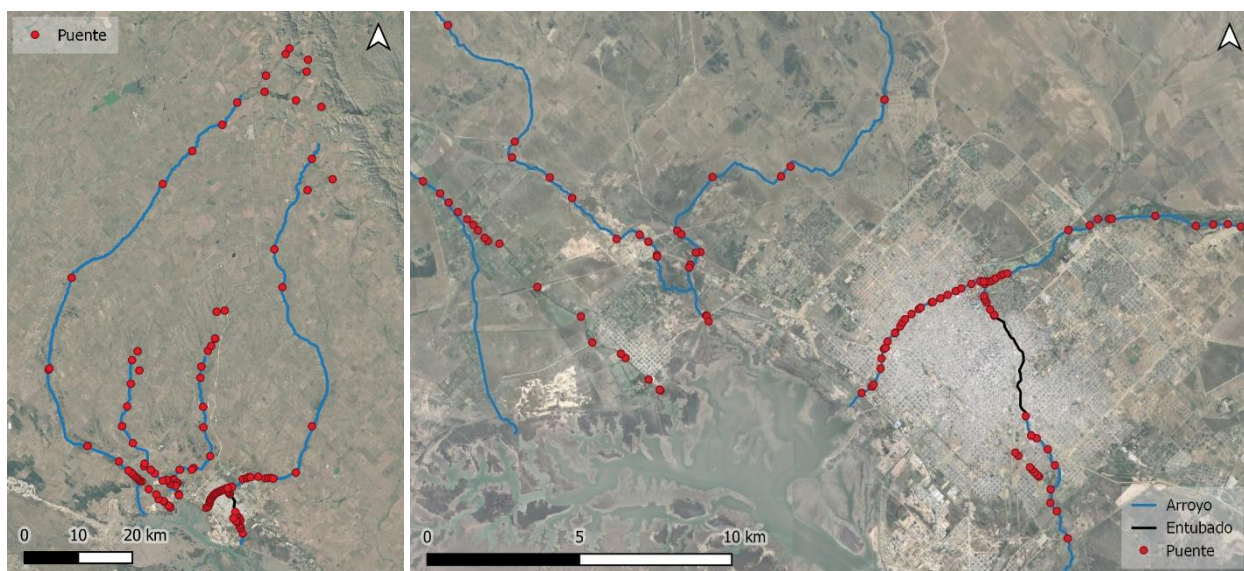


Figura 2.3. Localización de puentes en Bahía Blanca y su entorno.

Canal Maldonado

El Canal Maldonado fue construido durante la década de 1950 por la Dirección de Hidráulica de la Provincia de Buenos Aires para aliviar la descarga del arroyo Napostá. El canal de hormigón (Figura 2.4), de sección trapecial y alrededor de 6000 m de longitud, fue diseñado para transportar un caudal máximo de 260 m³/s (Señas et al., 2005).



Figura 2.4. Canal Maldonado (Fuente: La Nueva Provincia, 2022).

Entubado del arroyo Napostá

El entubado del arroyo Napostá corresponde a un tramo de alrededor de 3800 m dentro de la ciudad de Bahía Blanca, que va desde las calles Casanova hasta Estados Unidos, y que consiste en un conducto de hormigón armado de sección rectangular, con dimensiones del orden de 2.2 x 4.4 m que varían de acuerdo con el tramo. Los diferentes tramos presentan cantidades de celdas distintas, por ejemplo, en la embocadura en la calle Casanova se observa solo una celda (Figura 2.5).

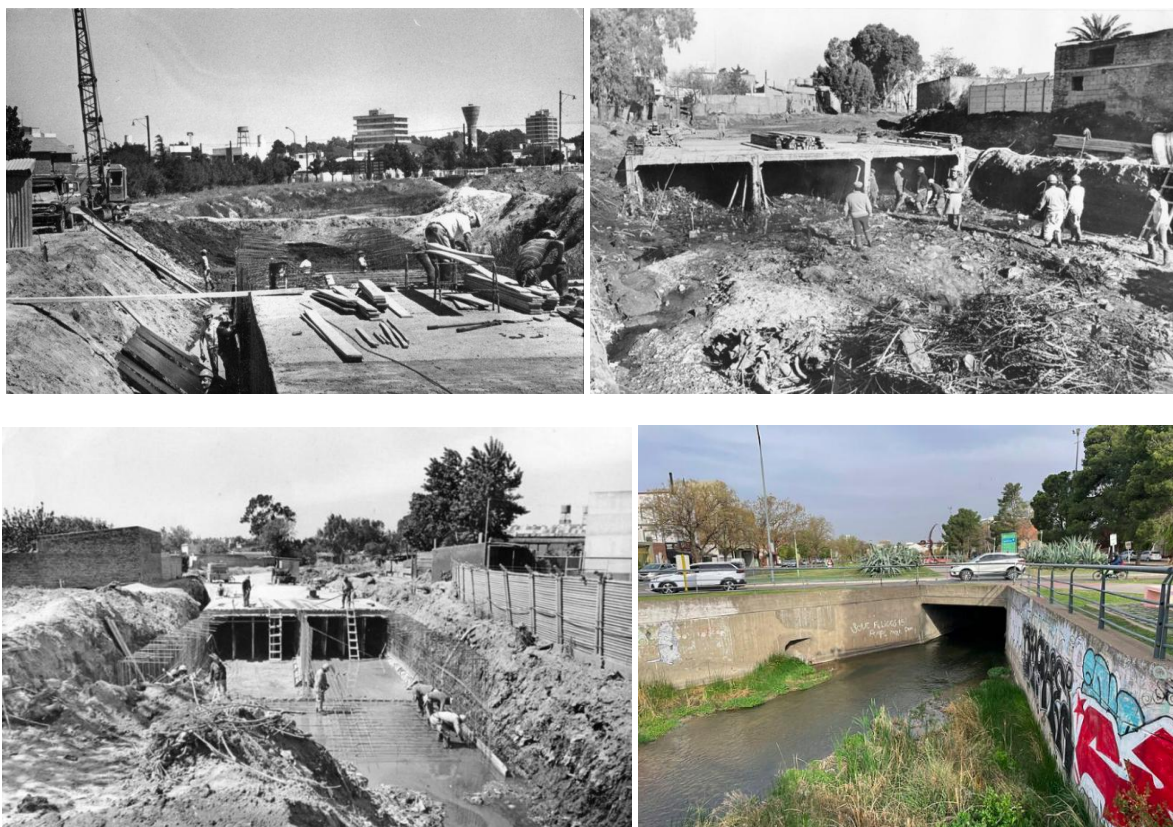


Figura 2.5. Entubado del arroyo Napostá: construcción y embocadura en calle Casanova (Fuente: La Nueva Provincia y Wikipedia, 2025).

Partidor

El Partidor de caudales entre el arroyo Napostá y el Canal Maldonado es una obra hidráulica localizada en el Parque de Mayo cuyo objetivo es el derivar los excedentes del flujo del arroyo hacia la canalización de alivio mediante un vertedero (Figura 2.6).



Figura 2.6. Partidor Arroyo Napostá - Canal Maldonado (Fuente: YouTube – Drones Bahía Blanca, Ulises Nicolini - 2017).

2.2. Modelo Digital del Terreno

Para la generación del Modelo Digital del Terreno (MDT) se utilizaron distintas fuentes de información, las cuales fueron integradas y compatibilizadas en un único producto que luego resultó insumo de la modelación hidrodinámica. En esta sección se detalla cada una de esas fuentes y cuáles son las principales limitaciones de estos.

2.2.1. Modelo Global: MDE MERIT

Como base de información para abarcar la extensión a nivel cuenca se utilizó un Modelo Digital de Elevación (MDE) global, específicamente el MDE MERIT (Multi-Error-Removed Improved-Terrain DEM). El MDE MERIT es un modelo digital de elevación de 3 segundos de arco (~90 m en el Ecuador) diseñado para minimizar errores presentes en otros modelos globales de elevación. Se generó a partir de datos de múltiples fuentes, incluyendo SRTM3 v2.1, AW3D30 y ICESat, con algoritmos de corrección de errores sistemáticos, como:

1. Errores de banda de radar (*striping errors*): Patrones artificiales lineales en la dirección de la órbita del sensor.
2. Errores de vegetación y edificaciones: Sobreestimaciones en áreas con alta cobertura de árboles o infraestructuras.
3. Errores de ruido aleatorio: Variaciones abruptas en la elevación debido a interferencias en la medición.

También, contempla la aplicación de técnicas avanzadas de procesamiento y fusión de datos, tales como:

- Corrección de vegetación y edificaciones usando datos ICESat para ajustar la elevación al nivel del suelo.
- Filtrado de ruido mediante métodos estadísticos para suavizar irregularidades.
- Interpolación y fusión de datos de diversas fuentes para mejorar la precisión.

A pesar de sus mejoras, el MERIT DEM aún presenta algunas limitaciones:

- Resolución limitada (~90 m), lo que impide capturar detalles finos del relieve.
- Errores residuales en áreas complejas, como montañas abruptas, regiones con datos insuficientes o cubiertas por nubes en las imágenes de entrada.
- Posible imprecisión en zonas urbanas debido a dificultades en la eliminación de edificios y estructuras artificiales.
- Falta de actualización: Basado en datos previos a 2010, por lo que no refleja cambios recientes en la topografía.

La Figura 2.7 presenta las elevaciones a escala de cuenca, mientras que en la Figura 2.8 se observa cómo la presencia de edificios es capturada por el MDE MERIT, lo que representa un error cuando se quiere determinar el nivel del terreno.

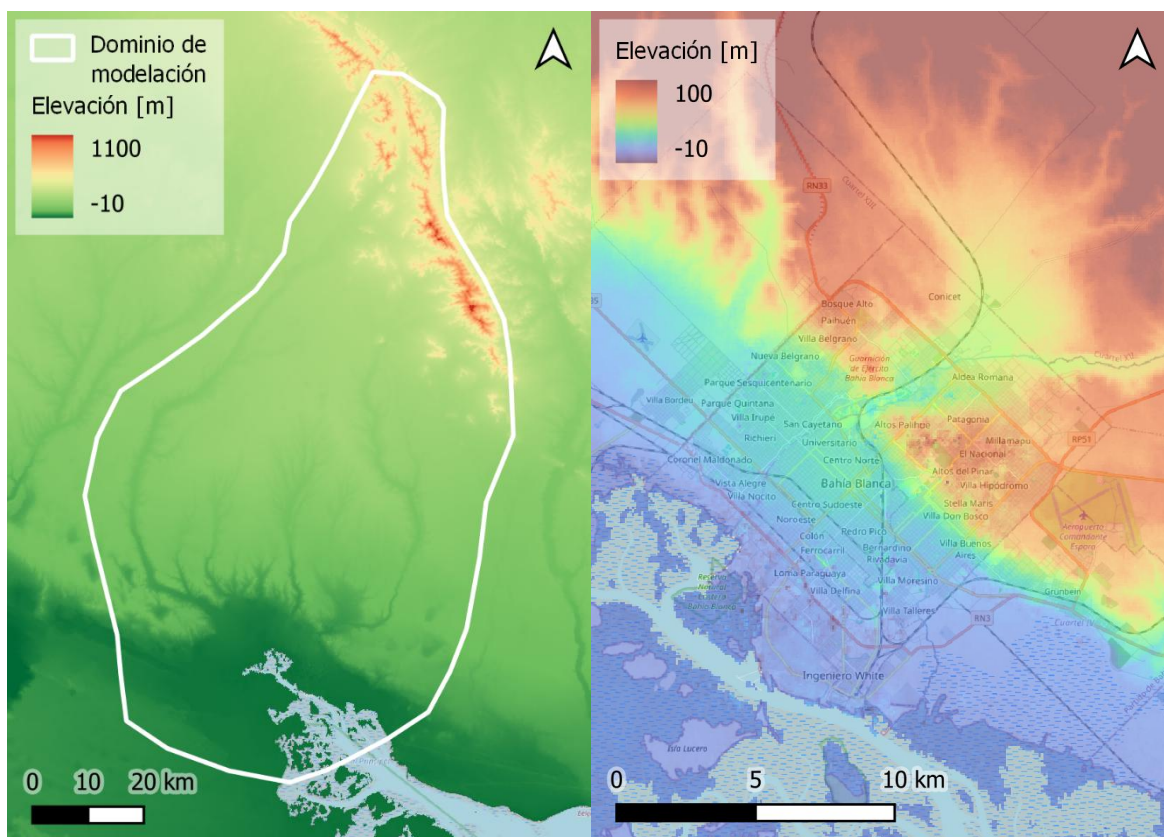


Figura 2.7. Elevaciones del MDE MERIT en el dominio de modelación.

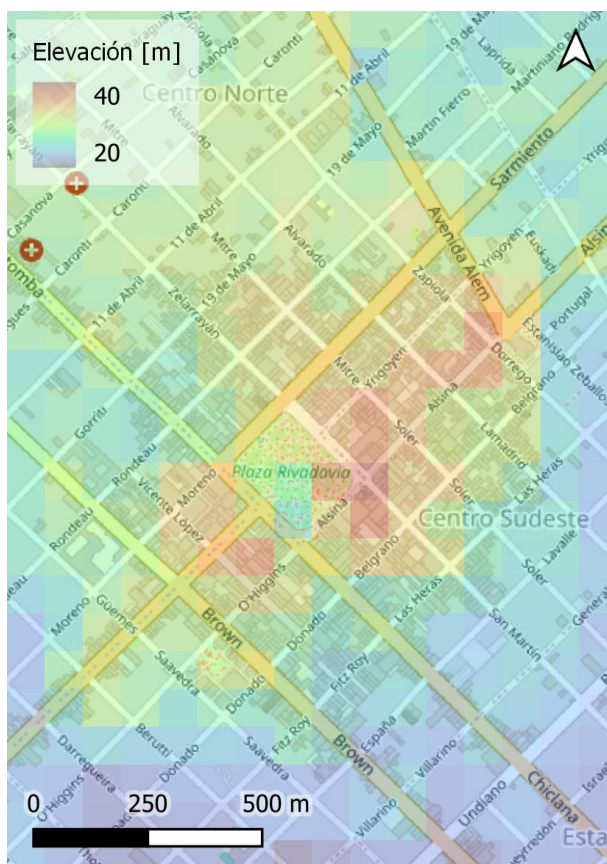


Figura 2.8. Elevaciones del MDE MERIT en el casco urbano.

2.2.2. Curvas de nivel y puntos IGN

Las curvas de nivel topográficas de las cartas del Instituto Geográfico Nacional (IGN) de Argentina son líneas que representan puntos de igual elevación referidos al Nivel Medio del Mar en Mar del Plata, adoptado como cero altimétrico en Argentina referidas al cero IGN. Se derivan de relevamientos topográficos y modelos digitales de elevación (MDE), y su precisión depende de la escala de la carta y de la técnica de levantamiento utilizada.

Las cartas topográficas del IGN utilizan la proyección Gauss-Krüger en el sistema POSGAR 94, que es el marco de referencia geodésico adoptado en Argentina basado en WGS84. Las cartas del IGN utilizadas tienen base en relevamientos antiguos, algunos de la década de 1960-1980. En el caso de Bahía Blanca, se utilizó las cartas topográficas en escala 1:50.000. Algunas hojas relevantes incluyen: Hojas 3763-21 y 3763-22 (1:50.000). La equidistancia resulta de 5 metros entre curvas.

Por otra parte, el IGN mantiene una red de puntos de nivelación de alta precisión, utilizados para estudios geodésicos y topográficos detallados. Estos puntos están referidos al cero IGN. En la Figura 2.9 se presentan las curvas de nivel digitalizadas junto con los puntos de la Red de nivelación.

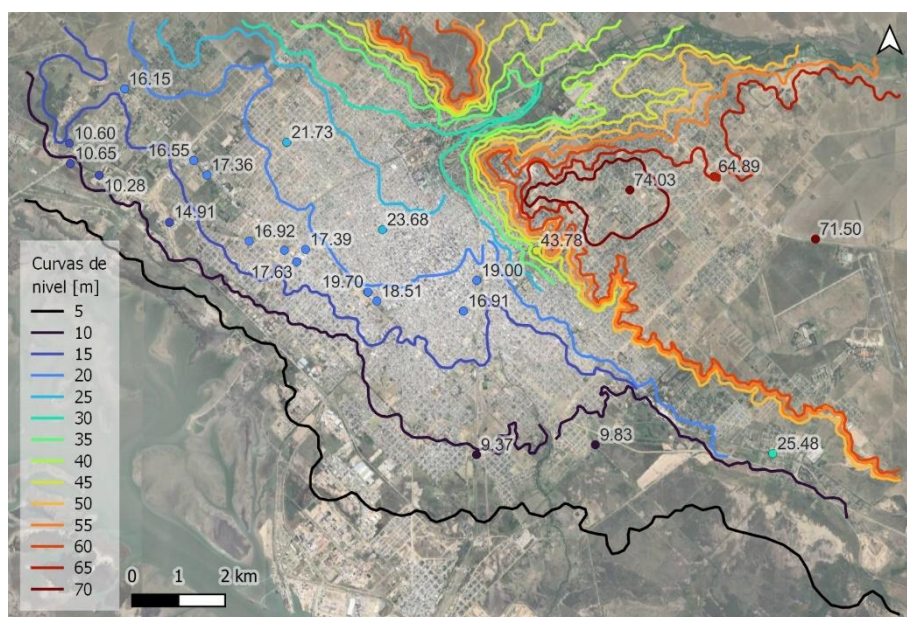


Figura 2.9. Curvas de nivel y puntos de alta precisión (IGN).

2.2.3. Batimetría del estuario

Con el objetivo de dar continuidad al MDT utilizado en la modelación numérica se buscó definir una batimetría del estuario de Bahía Blanca. Las cartas náuticas del Servicio de Hidrografía Nacional (SHN) indican hitos para la navegación, curvas de igual profundidad referido al límite inferior de la media de las bajamares de sicigias de los distintos puertos en el que se encuentra la carta. En este caso se utilizó la carta náutica H256, que define al estuario de Bahía Blanca y está provista por el Servicio de Hidrografía Naval. En la Figura 2.10 se muestran los puntos batimétricos y las isobatas digitalizadas para la complementación del MDT.

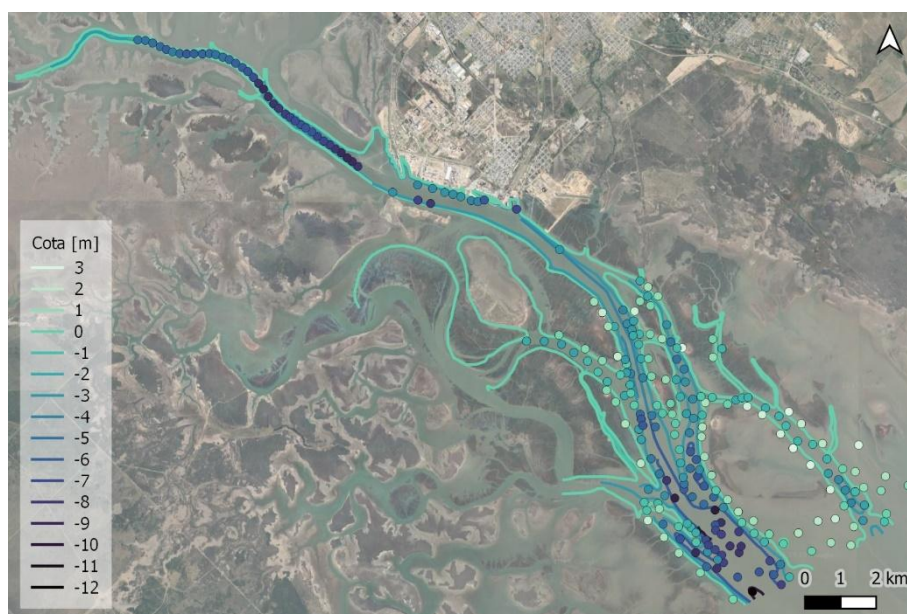


Figura 2.10. Isobatas y puntos batimétricos de la carta náutica H256 del SHN.

2.2.4. Modelo resultante

La combinación de las fuentes asociadas al MDE de MERIT, las cartas topográficas del IGN y las cartas náuticas del SHN permitieron definir el modelo digital del terreno (MDT) específico para la resolución de este problema. Esta primera versión se denomina MDT_BB_v1-0 (Figura 2.11), esperando alcanzar versiones mejoradas en un futuro próximo.

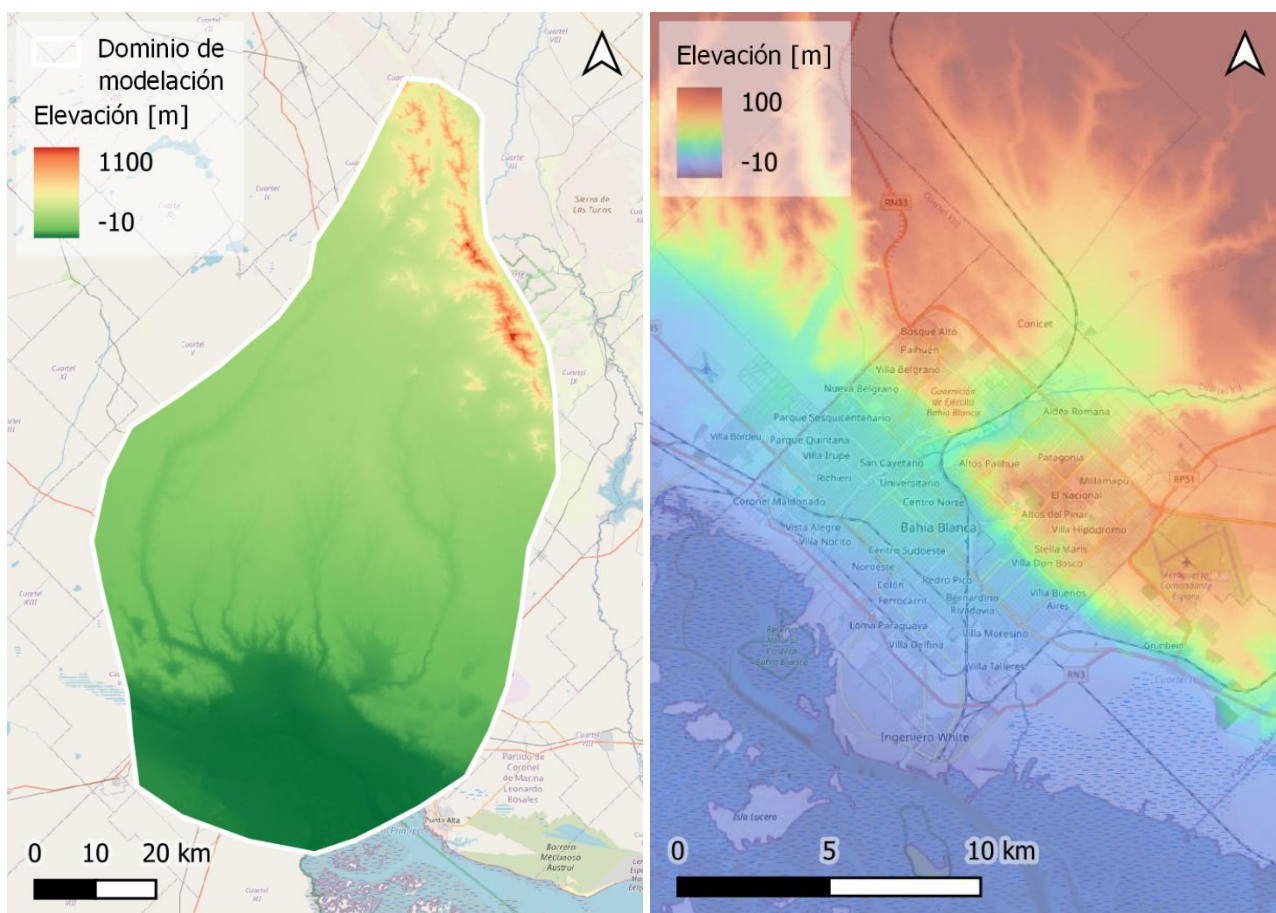


Figura 2.11. Modelo digital del terreno MDT_BB_v1-0.

2.3. Información pluviométrica

La información oficial de precipitaciones en la zona corresponde a la estación del Aeropuerto de Bahía Blanca perteneciente al Servicio Meteorológico Nacional. Por el momento no se cuenta con la información pluviográfica del evento en esa estación por lo que se buscaron fuentes alternativas para caracterizar la precipitación.

Weather Underground (*Wunderground*) es una plataforma en línea que proporciona datos meteorológicos en tiempo real. *Wunderground* recopila información de estaciones meteorológicas oficiales y no oficiales en todo el mundo, pero que en su mayoría son sistemas de medición de meteoaficionados. Durante el temporal de Bahía Blanca, aun con salidas de servicio, unas 11 estaciones de la región reportaron datos de precipitación (Figuras 2.12). Los registros

obtenidos a través de este tipo de estaciones muestran consistencia respecto de las intensidades observadas, sobre todo en las primeras horas de la tormenta, y la localización (Figura 2.13).

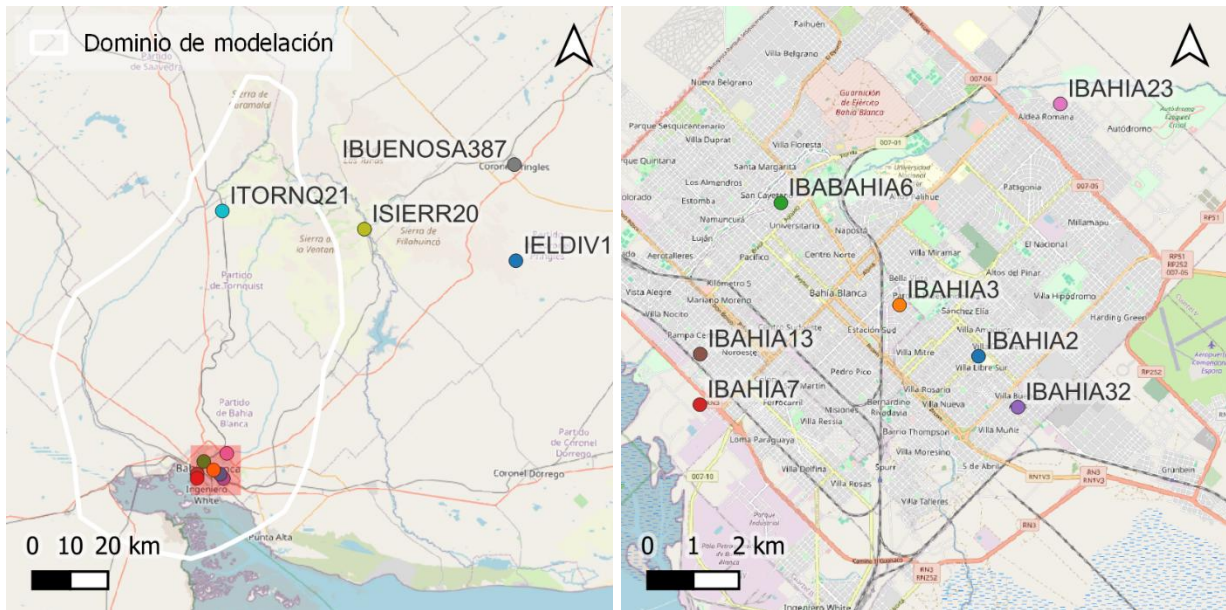


Figura 2.12. Localización de información pluviométrica disponible.

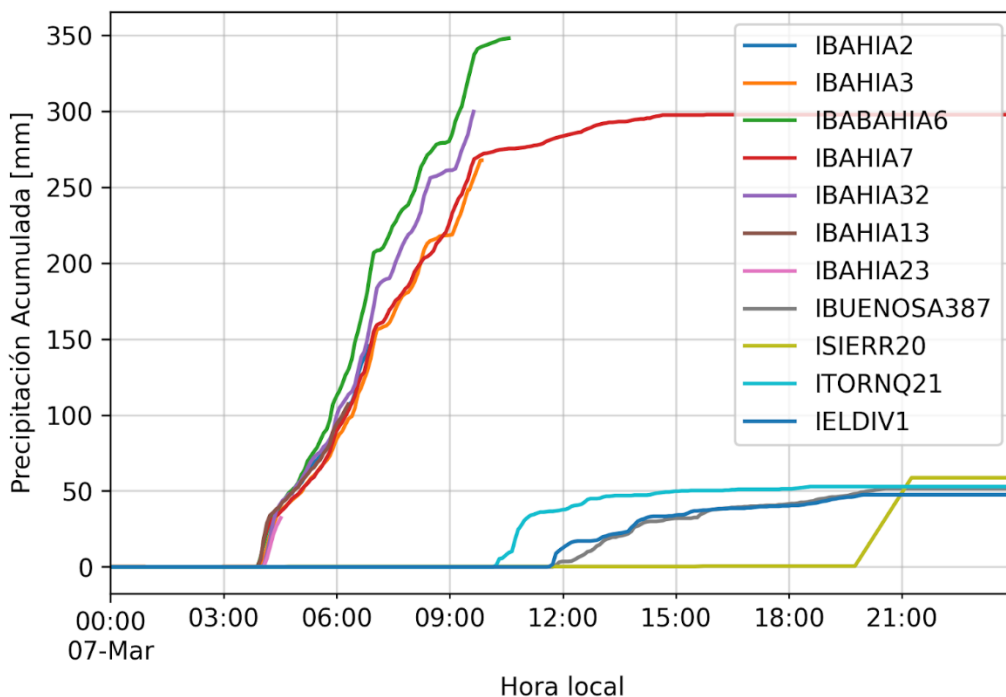


Figura 2.13. Registros pluviométricos de estaciones conectadas al sistema Wunderground.

El producto experimental SQPE-OBS, que desarrolla y disponibiliza el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), basado en la técnica Hidroestimador (Hobouchian et al., 2014, 2021), presenta la estimación de precipitación satelital ajustada con observaciones pluviométricas a escala diaria con una resolución espacial de 0.1° y cubriendo el sur de Sudamérica. Esta última corrección

incluye el valor agregado de las redes de estaciones meteorológicas que se integran continuamente en el SMN. Para el análisis del evento del viernes 7 de marzo de 2025 se cuenta con la precipitación acumulada en el entorno de la ciudad de Bahía Blanca. En la Figura 2.14 se observa que los mayores valores de precipitación diaria se dieron en la zona urbana (cuencas bajas) alcanzando valores del orden de los 300 mm, consistentes con las observaciones directas disponibles.

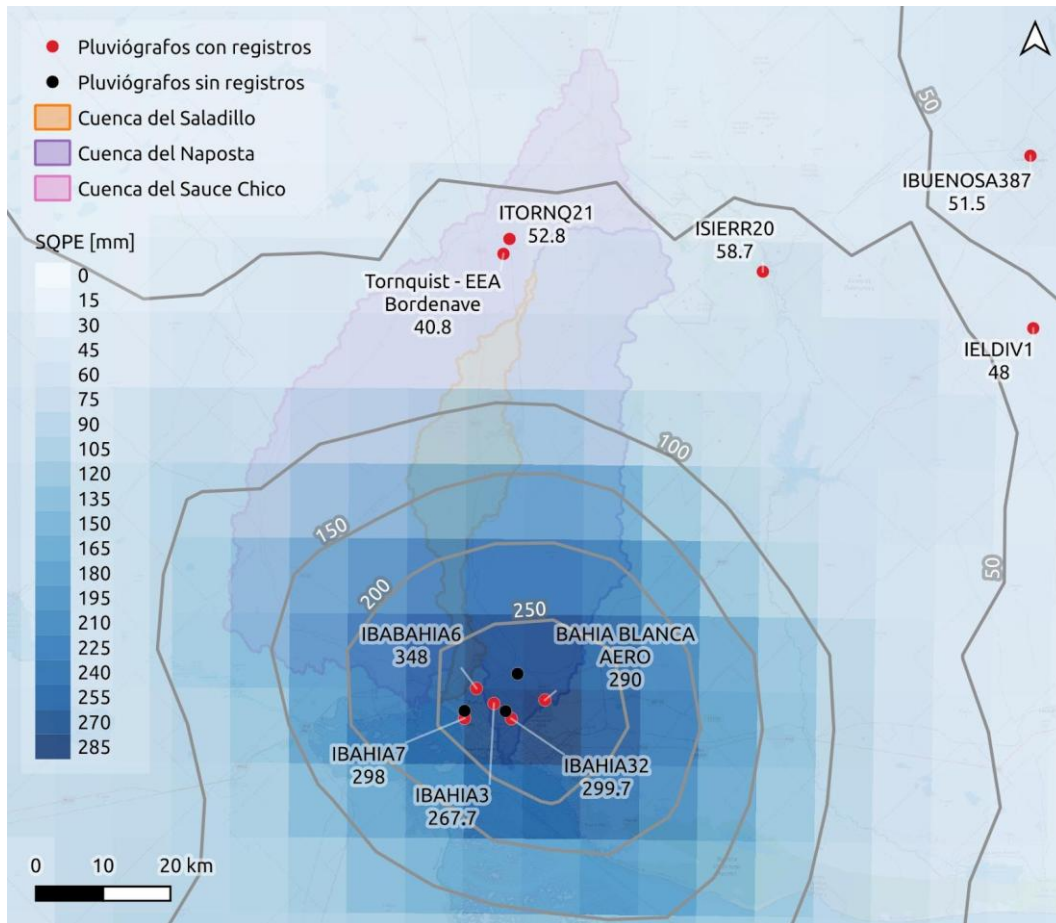


Figura 2.14. Registros pluviométricos de estaciones conectadas al sistema Wunderground y comparación con el producto experimental SQPE-OBS (SMN).

2.4. Nivel de marea

Para la definición de la condición de borde sobre el estuario de Bahía Blanca se utilizó la marea predicha por el SHN para el puerto de Ingeniero White. Con los niveles de pleamar y bajamar de la onda de marea astronómica, se reconstruyó la serie con un paso temporal de 15 minutos generando la onda completa. Se corrigió el nivel utilizando como referencia el plano de reducción de Ingeniero White que indica el SHN con un valor de 2.74 metros.

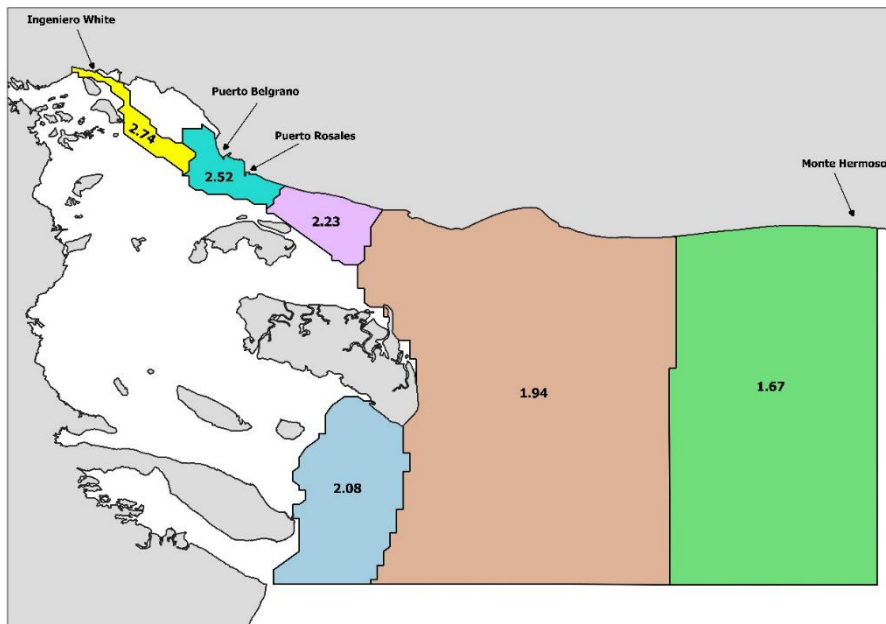


Figura 2.15. Planos de reducción utilizados para el estuario de Bahía Blanca (SHN)

En la Figura 2.16 se presenta la serie de niveles para el período en estudio donde se observa una amplitud de aproximadamente 4 m, dado el nivel de bajamar de -2.46 metros a las 6:05 y el de pleamar de 1.51 m a las 12:30 del 7 de marzo de 2025.

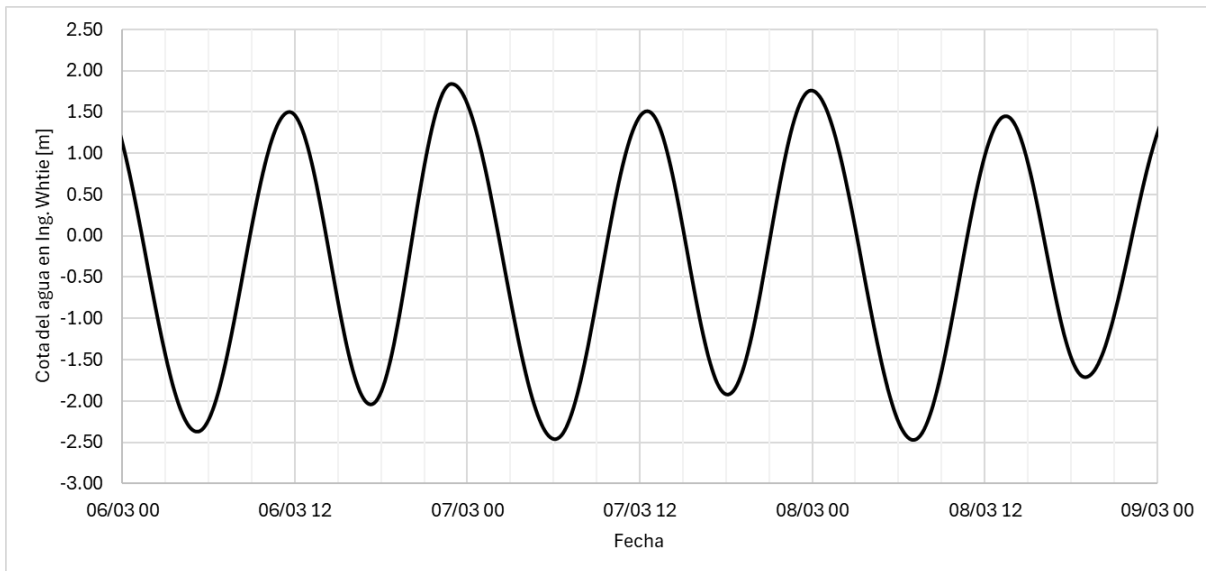


Figura 2.16. Nivel de la marea en Ingeniero White respecto al nivel medio del mar (SHN).

2.5. Uso del suelo

El uso de suelo se caracterizó mediante los datos de *Land Cover Explorer* del ESRI Living Atlas (<https://livingatlas.arcgis.com/landcoverexplorer>). Esta base de datos proporciona información sobre la cobertura y el uso del suelo a nivel global con actualizaciones anuales desde 2017. Se basa en imágenes satelitales y modelos de aprendizaje automático para clasificar diferentes tipos de

cobertura terrestre. La clasificación detallada del uso del suelo la proporciona en categorías como bosques, cultivos, agua, áreas urbanas, entre otras (Figura 2.17).

Dentro de la ciudad se discriminaron usos vinculados a las manzanas (viviendas) de las calles y los cursos de agua.

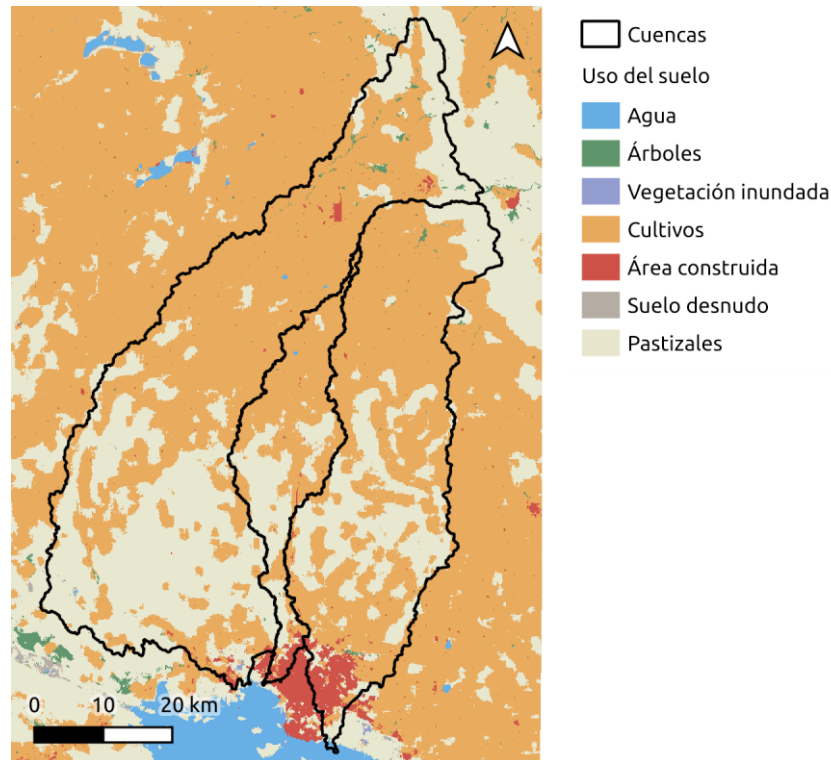


Figura 2.17. Uso del suelo en las cuencas del sistema hídrico estudiado.

3. OBSERVACIONES INDIRECTAS

3.1. Marcas de altura máxima de inundación

3.1.1. Metodología

Durante la ocurrencia de eventos de inundación significativos, en las redes sociales se reproduce conversación en torno a los impactos que produce. En ese marco, se realizan posteos que permiten identificar tipos de impactos (en algunos casos acompañados de fotografías o video filmaciones), haciendo que esta información, en general producida desde la componente ciudadana, resulte de interés para realizar cuantificaciones. Desde el Laboratorio de Hidráulica del INA se ha planteado una metodología para compilar este tipo de información, georreferenciarla y, eventualmente, utilizarse para modelaciones o análisis específicos (Re et al., 2019, 2022).

La metodología del INA permite recopilar tuits y videos públicos, utilizando las Interfaces de Programación de Aplicaciones (API) de X/Twitter y YouTube. Dadas las restricciones actuales en la API de X/Twitter, en este trabajo se hizo especial énfasis en los videos publicados en YouTube. La estrategia de búsqueda de videos de interés en YouTube se realizó para el periodo iniciado el 7 de marzo de 2025 a las 00:00 hs. La estrategia de búsqueda consistió en el uso de la API de YouTube para encontrar videos asociadas con dos palabras claves, una relativa a la localización geográfica (Tipo 1) y otra a características del evento (Tipo 2). A continuación, se detallan las palabras, infiriéndose las múltiples combinaciones entre las Tipo 1 y las Tipo 2:

- *Palabras claves Tipo 1:* “Bahía Blanca”, “Napostá”, “Maldonado”, “Ingeniero White”, “General Cerri”, “Bella Vista”, “Tiro Federal”, “La Falda”
- *Palabras claves Tipo 2:* “inundación”, “inundado”, “tormenta”, “temporal”, “catástrofe”

Para este período de análisis, 128 videos fueron visualizados, requiriendo esta tarea alrededor de 40 horas de dedicación. De este total de videos, 38 de ellos, fueron descartados por no pertenecer al evento en estudio (alrededor del 30%). Del total restante de videos, 33 presentaron marcas máximas de inundación que pudieron ser georreferenciadas.

Basado en las imágenes y el audio de los videos, además de *Google Street View*, fue posible georreferenciar con precisión las zonas afectadas por las inundaciones y estimar al decímetro la altura alcanzada por el agua (referida al nivel de calle). Entre los elementos visuales utilizados para la georreferenciación se encuentran tramos reconocibles de calles y avenidas, comercios y rutas de colectivos. En algunos casos, el audio colabora, identificando también nombres de calles y avenidas, referencias a barrios, nombres de escuelas y otros puntos geográficos mencionados por la prensa y las personas afectadas por las inundaciones. A pesar de representar, a priori, un volumen reducido de información, estos resultados son suficientes para establecer una

cuantificación de impactos, además de ser posibles de ser utilizados para la validación espacial de la modelación numérica en sitios específicos.

En general, ante eventos de inundación significativos, las fuentes de los videos son principalmente dos: videos filmados por personas afectadas por las inundaciones (comunidad) y videos generados por la prensa. El porcentaje de videos de prensa con información útil suele no ser despreciable, pero en el caso de este evento ha sido determinante (más del 90% del total). Esta situación se explica por la gravedad del impacto de la inundación sobre un gran sector de la población, lo que limitó las posibilidades de uso de teléfonos celulares para la toma de registro.

La gran mayoría de los videos georreferenciados presentan reportajes a personas afectadas por la inundación, en donde se muestran los niveles máximos alcanzados por el agua. Este tipo de intercambio refuerza el aspecto ciudadano de la contribución.

3.1.2. Mapa

En la Figura 3.1 se presenta la localización de las 33 marcas de inundación máxima registradas al momento. Se han observado valores que superan los dos metros. También se ve que las marcas están agrupadas principalmente en zonas específicas: Barrio Napostá, Ingeniero White y Parque de Mayo. Esto se explica porque son las zonas que han documentado preferentemente los medios de comunicación.

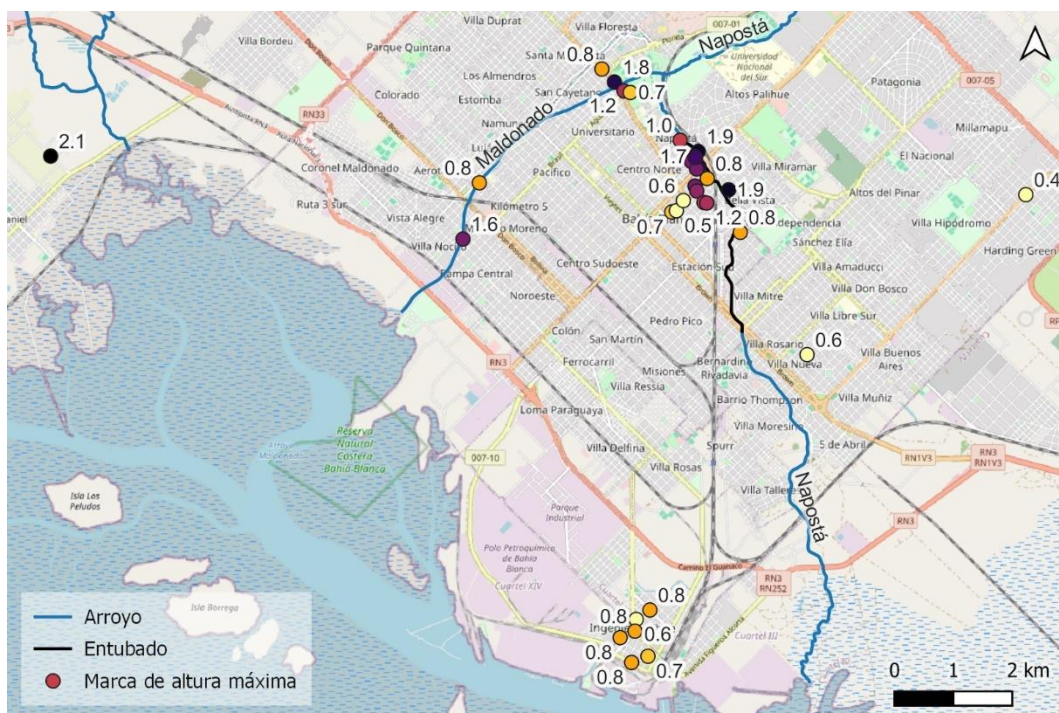


Figura 3.1. Marcas de inundación máxima.

En la Figura 3.2 se presentan con mayor detalle los resultados en el barrio Napostá y en Ingeniero White. En ambos casos los valores estimados son consistentes con valores del orden de 2.0 m y 0.8 m respectivamente.

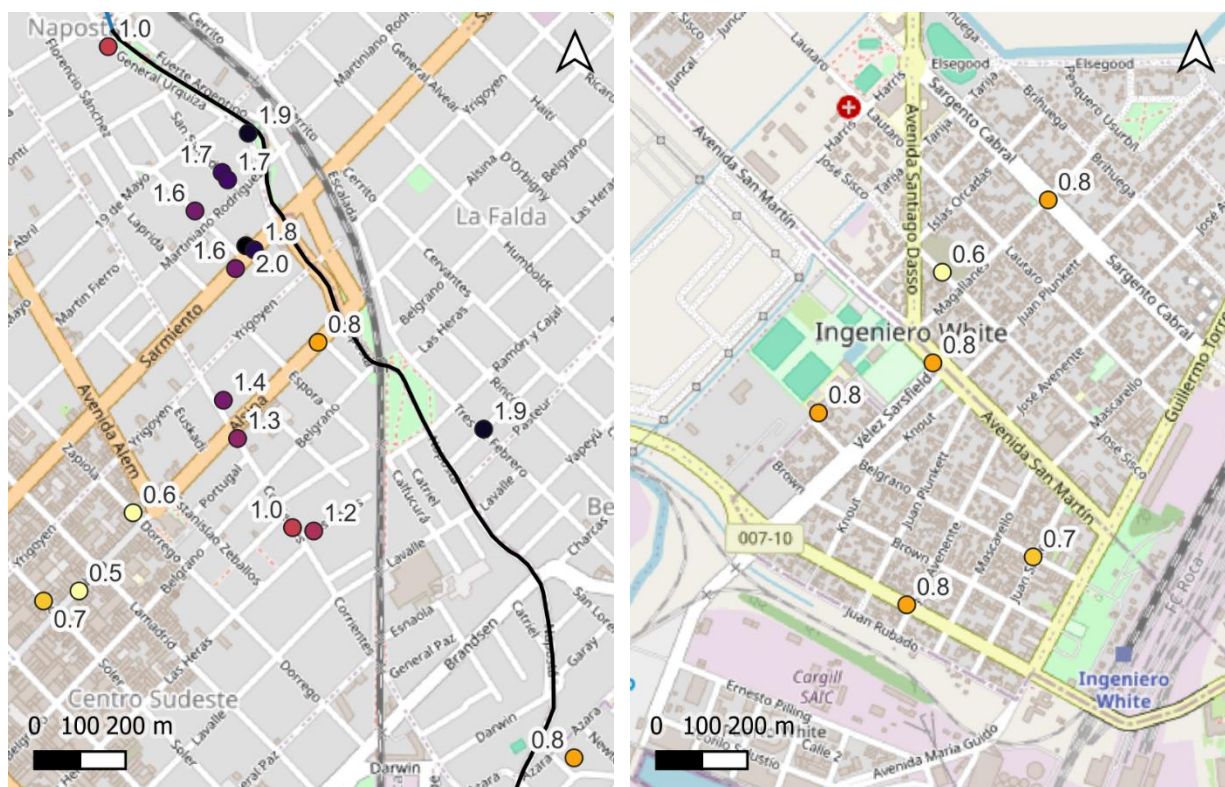


Figura 3.2. Marcas de inundación máxima: barrio Napostá e Ingeniero White.

En el Anexo 1, para cada punto del mapa, se presenta la marca detectada y la localización referenciada.

3.2. Hidrogramas estimados

Dos de los videos encontrados mostraron la evolución temporal de la inundación. Tomando los horarios informados en cada uno de ellos y las referencias visibles, se estimaron alturas de inundación de tal manera de definir dos hidrogramas. Ambos videos están localizados en el barrio Napostá, una de las zonas más impactadas por el evento. En las Figuras 3.3 y 3.4 se presentan los distintos instantes de cada sitio durante la inundación. En las Tablas 3.1 y 3.2 se detallan las estimaciones realizadas.

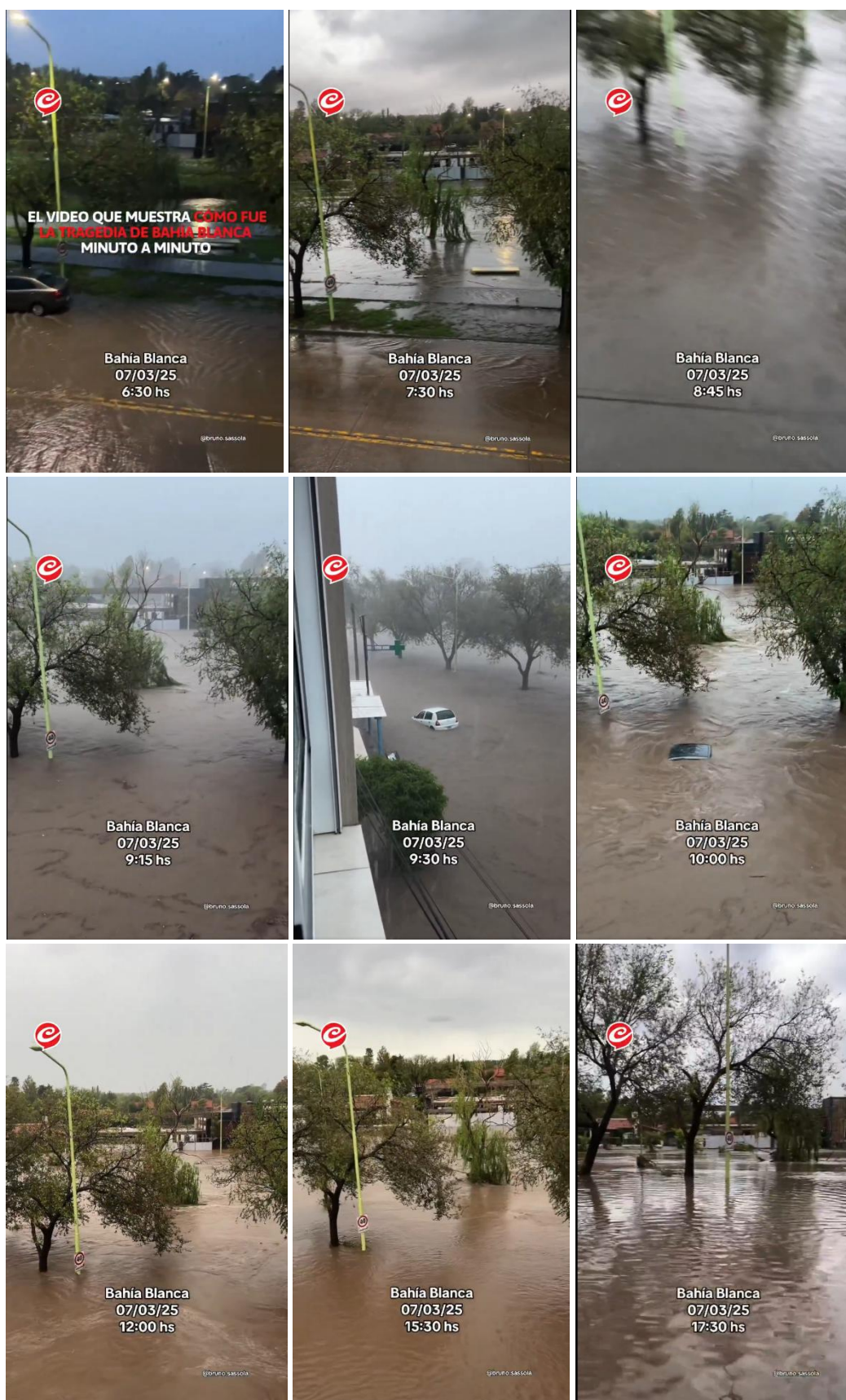
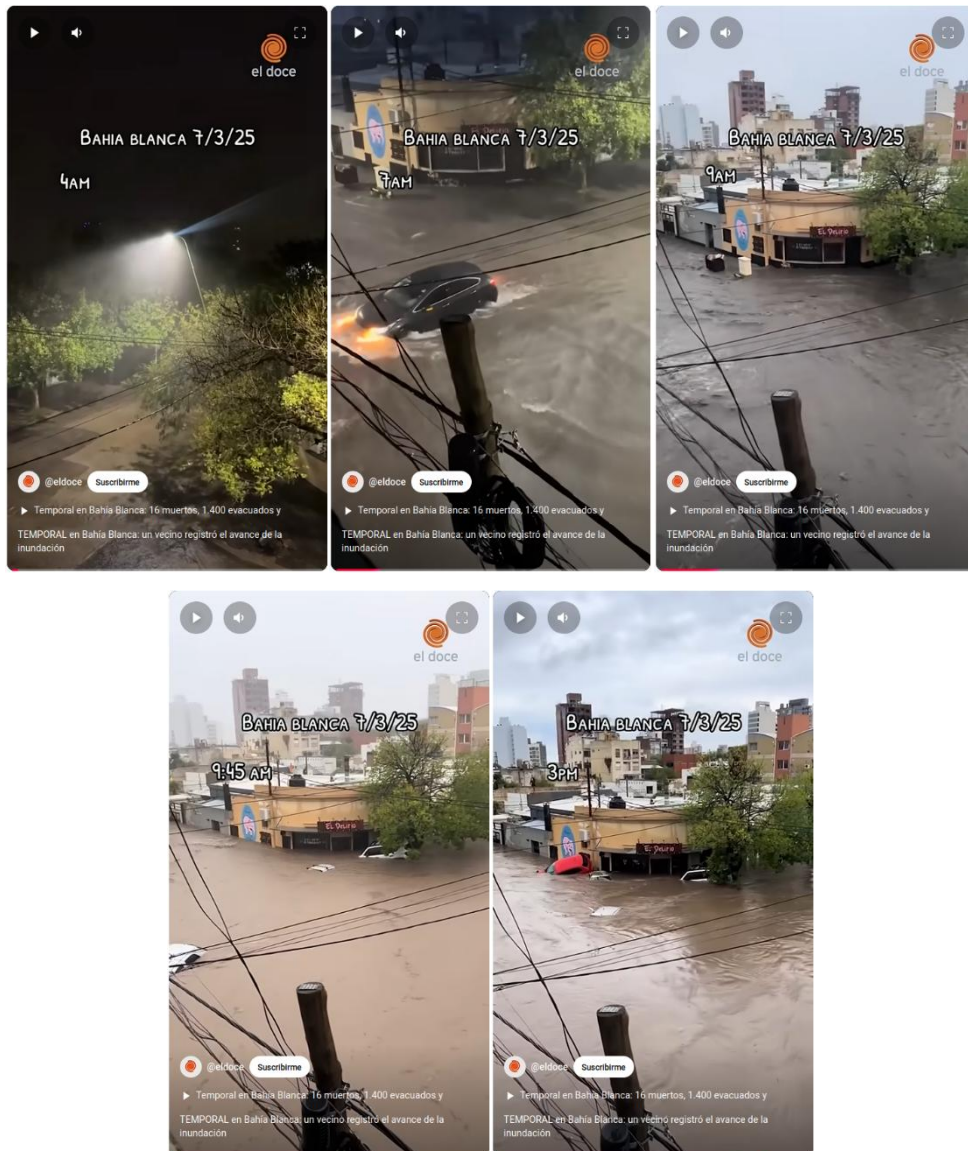


Figura 3.3. Registro ciudadano en el arroyo Napostá (referencia Farmacia Moscoso). Fuente: @bruno.sassola a través de TikTok, republicado por @cronica vía X/Twitter.

Tabla 3.1. Estimación de profundidades de inundación en el entorno de Farmacia Moscoso.

Fecha y hora	Altura	Referencia	Observaciones
7/03/2025 6:30	0.10	Cordón de la vereda	Arroyo con capacidad - Agua en calle
7/03/2025 7:30	0.05	Cordón de la vereda	Arroyo con banca llena - Desbordes.
7/03/2025 8:45	0.30	Chasis del auto	-
7/03/2025 9:15	0.50	Cubierta de colectivo	-
7/03/2025 9:30	0.60	Vehículo flotando	-
7/03/2025 10:00	1.10	Cartel de velocidad	-
7/03/2025 12:00	1.30	Cartel de velocidad	-
7/03/2025 15:30	0.80	Cartel de velocidad	Recesión del evento
7/03/2025 17:30	0.40	Cartel de velocidad	Recesión del evento



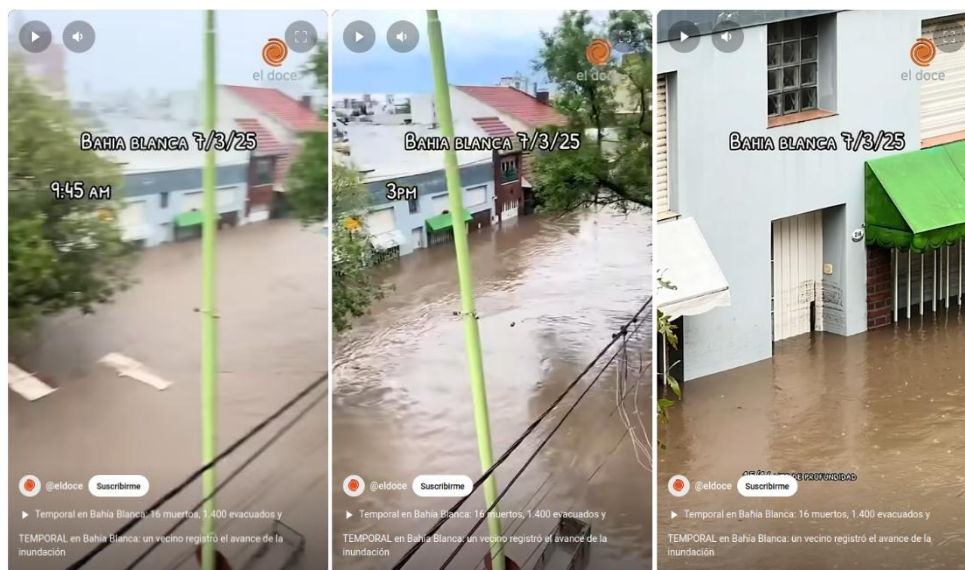


Figura 3.4. Registro ciudadano en barrio Napostá (referencia Rotisería El Delirio). Fuente: difundido por @eldoce vía YouTube.

Tabla 3.2. Estimación de profundidades de inundación en el entorno de Rotisería El Delirio.

Fecha y hora	Altura	Referencia	Observaciones
7/03/2025 7:00:00	0.25	Ruedas de autos	-
7/03/2025 9:00:00	0.40	Chasis del auto	-
7/03/2025 9:45:00	0.70	Capot de los vehículos	-
7/03/2025 12:00:00	1.60	Máximo según puerta blanca	Horario estimado
7/03/2025 15:00:00	0.60	-	-

3.3. Estimación de velocidades

3.3.1. Metodología

A partir de video filmaciones encontradas en YouTube, en donde se mostraban los cauces principales del sistema hídrico de Bahía Blanca y su entorno, se utilizó la metodología de velocimetría por imágenes, específicamente LSPIV, para estimar velocidades del flujo.

No se hallaron muchos videos de los cauces que por varios segundos mantuvieran el mismo encuadre. De todas maneras, se logró trabajar con dos videos, uno filmado el día del evento alrededor del mediodía (7 de marzo) y el otro el día posterior en horas de la mañana (8 de marzo). Los detalles de estos videos se presentan en la Tabla 3.3 y la Figura 3.5, y sus registros pueden asociarse a los hidrogramas de crecida (Tablas 3.1 y 3.2). En la Figura 3.5 se presenta la localización sobre el Canal Maldonado de los dos casos analizados.

Tabla 3.3. Videos utilizados para la estimación de velocidades.

Caso	Localización	Cruce	Video	Fecha
1	Canal Maldonado	Agustín Álvarez	https://youtu.be/naimgsSJxLk	7/3/2025
2	Canal Maldonado	Castelli	https://youtu.be/tzli2ICUMLw	8/3/2025

Para cada caso se estimó el campo de velocidad medio superficial haciendo uso de la técnica LSPIV (*Large Scale Particle Image Velocimetry*). Esta metodología se implementa a partir de la obtención de una videofilmación estática de la superficie de un curso de agua, con una duración suficiente como para obtener parámetros estadísticos representativos que permitan la evaluación del desplazamiento de estructuras de flujo y/o trazadores superficiales. En el caso de contar con videofilmaciones con cierto nivel de movimiento se utilizan algoritmos de estabilización para fijar el cuadro. Luego, la selección de fotogramas rectificadas y con una discretización temporal constante permite realizar distintos tipos de procesamientos y/o análisis para obtener la velocidad superficial del flujo. Conocida la batimetría de una sección transversal y con el campo de velocidades en superficie, y asumiendo que la distribución de velocidades en la columna de agua presenta una distribución logarítmica estándar, se puede obtener el caudal total en la sección. Por el momento, dada la información disponible, se procedió solo a realizar el cálculo del campo de velocidades en superficie.

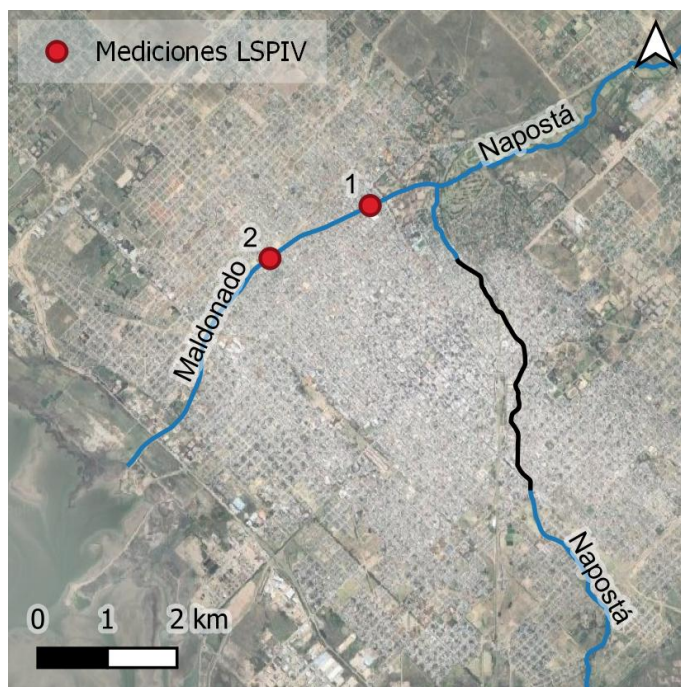


Figura 3.5. Localización de los videos utilizados para la estimación de caudales mediante velocimetría por imágenes.

Para la implementación de la técnica LSPIV se trabajó con dos software de código abierto ampliamente utilizados en el campo de la hidrometría como RIVeR (Patalano et al., 2017) y FUDAA (Le Coz et al., 2014).

El postprocesamiento requirió trabajar con referencias de las dimensiones tomadas de imágenes satelitales en la traza del Canal Maldonado. Dado que se trató de una crecida extraordinaria se asumió que la relación entre la velocidad superficial y velocidad media es igual a 1 (coeficiente *alpha*).

3.3.2. Resultados

En ambos casos de análisis, las principales incertidumbres de los resultados obtenidos están asociadas a la estimación de distancias conocidas en las imágenes, y en menor medida a la baja calidad del video y a la corta duración de la filmación.

Caso 1 - Canal Maldonado y Agustín Álvarez

En el Caso 1 se estimó el campo de velocidad superficial medio obtenido con RIVeR y FUDAA, ya que, además, el ángulo visual y las obstrucciones presentes no permitieron un cálculo efectivo en una sección transversal completa. La hipótesis principal con la cual se trabajó es que el Canal Maldonado se encontraba a sección llena y se rectificaron las imágenes midiendo el ancho del puente visible (Figura 3.6).

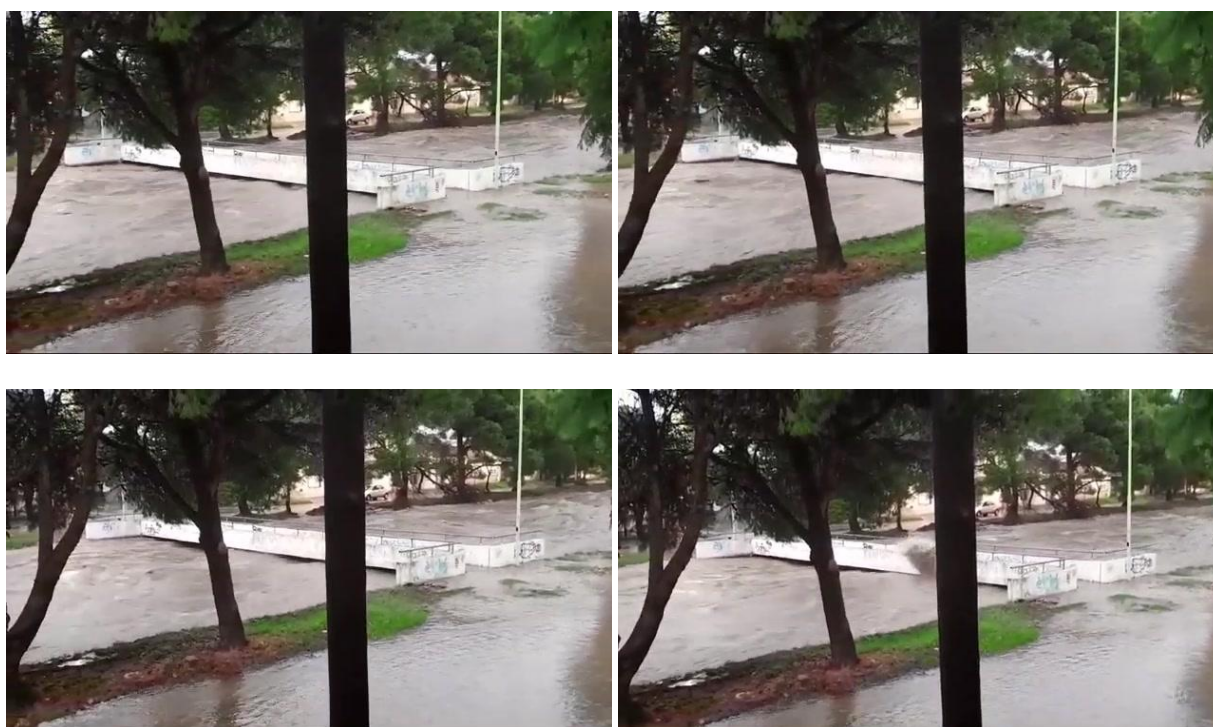


Figura 3.6. Fotogramas en el que se comienza a observar el choque de la onda de crecida con el puente peatonal (Avenida de Mayo al 600).

Se obtuvo la velocidad media en tres sectores del canal: a 3 m de la margen izquierda, en el centro del canal y a 3 m de la margen derecha. Las velocidades medias obtenidas resultaron de 3.5 m/s, 4.5 m/s y 3.5 m/s respectivamente (Figuras 3.7 y 3.8).

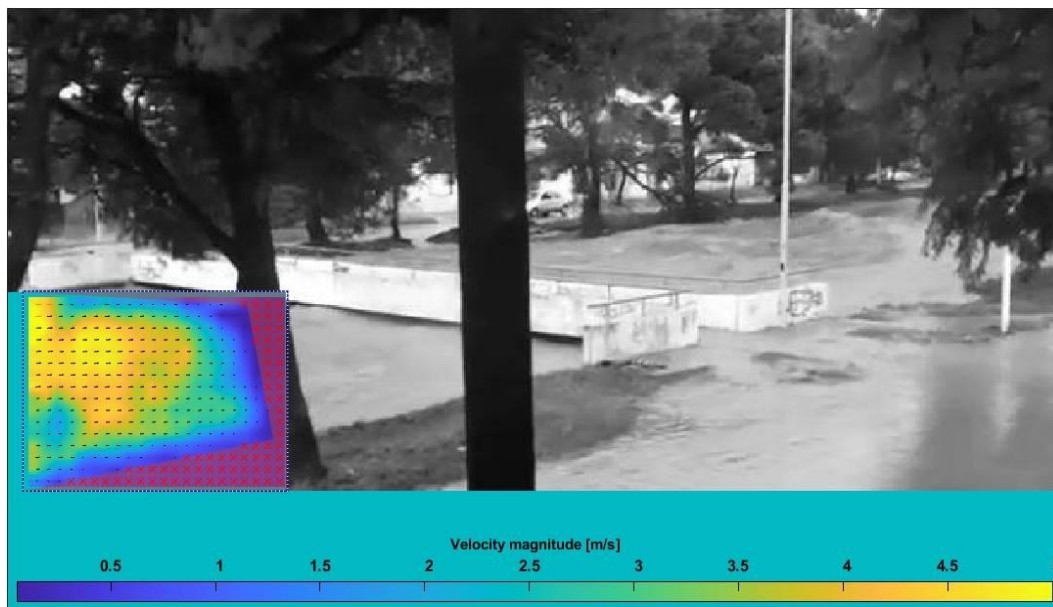


Figura 3.7. Campo de velocidad superficial media obtenido con RIVER.



Figura 3.8. Campo de velocidad superficial media obtenido con FUDAA.

En este caso se realizó una validación adicional vinculando los tipos de energía del flujo, dado que el golpe sobre el tablero del puente peatonal elevaba cierto volumen de agua (Figura 3.9), lo cual es una transformación de la energía cinética a potencial. La altura alcanzada por el agua se estima en 1.3 m respecto de la superficie libre, lo que se puede asociar con una velocidad superficial aproximada de 5 m/s. Si bien es un cálculo que conlleva ciertas hipótesis (por ejemplo, pérdidas nulas de energía en el impacto), permite obtener un valor orientativo de la velocidad superficial.



Figura 3.9. Flujo contra el tablero del puente peatonal y referencia de una persona.

Caso 2 - Canal Maldonado y Castelli

En este caso se trabajó con un video filmado al día siguiente de la crecida en el cual aún se observaban velocidades superficiales altas (Figura 3.10). Entre las incertidumbres principales se cuentan las asociadas con la determinación de distancias conocidas.



Figura 3.10. Fotogramas consecutivos en Canal Maldonado y Castelli.

Para la rectificación de la imagen se utilizaron distancias aproximadas basadas en el ancho del canal y la longitud de placas visibles.

Las velocidades máximas observadas (Figuras 3.11 y 3.12), consistentemente con ambos algoritmos (RIVeR y FUDAA), se encuentran en el rango de 2.5 m/s a 2.8 m/s.

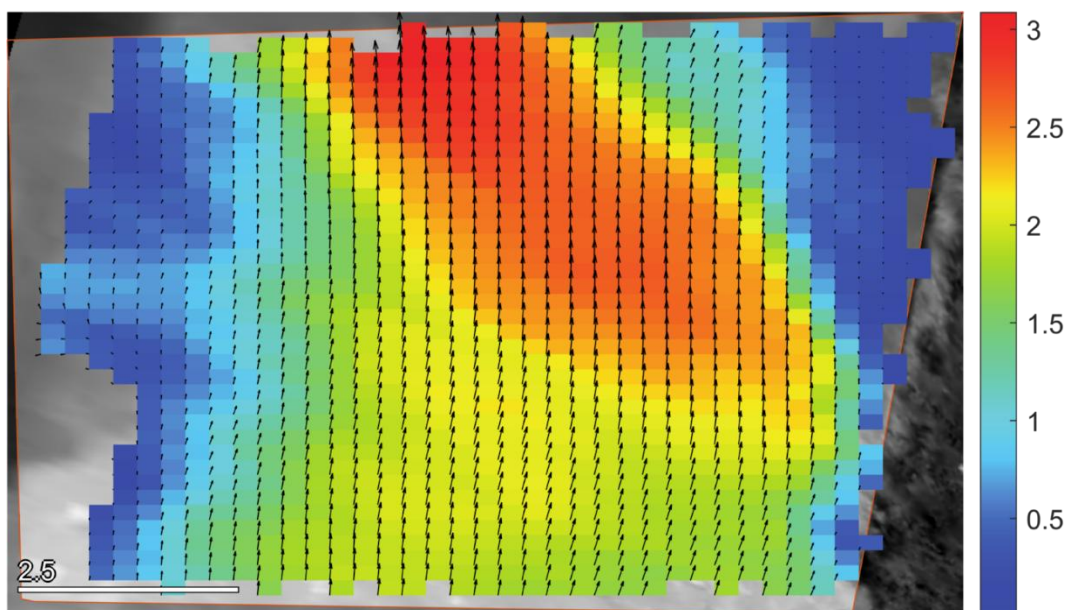


Figura 3.11. Campo de velocidad superficial media obtenido con RIVER.

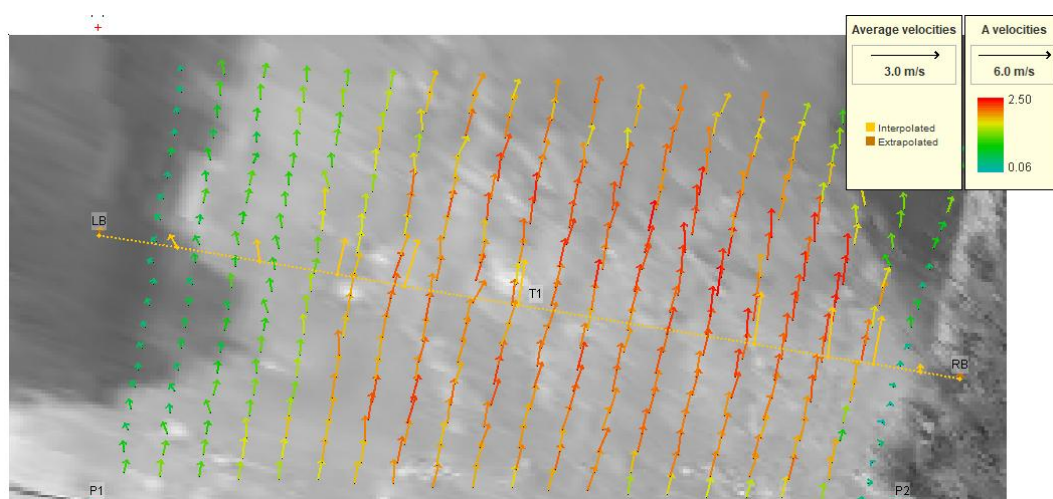


Figura 3.12. Campo de velocidad superficial media obtenido con FUDAA.

4. MODELO HIDRODINÁMICO

4.1. Software

El sistema HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center - River Analysis System*) es un software desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos (USACE). Es ampliamente utilizado por la comunidad hidrológica e hidráulica y su aplicación involucra el estudio de problemas en cursos de agua, tanto naturales como artificiales, en régimen permanente e impermanente, para análisis del escurrimiento unidimensional (1D) y/o bidimensional (2D), transporte de sedimentos, evolución morfológica y calidad de agua. Utiliza un esquema numérico de volúmenes finitos para resolver las ecuaciones de aguas poco profundas.

El modelo bidimensional permite la utilización de celdas no regulares de hasta ocho lados con refinamientos locales, permitiendo generar mayor detalle en los cursos de agua, infraestructura o hitos determinantes para la modelación hidráulica. El modelo puede incorporar estructuras en su dominio bidimensional, incluyendo puentes, terraplenes, alcantarillas, conducciones, presas, etc. Estas estructuras se modelan internamente y presentan sus resultados en las celdas a las que están conectadas, determinando condiciones de borde internas.

Las condiciones de borde externas pueden ser de niveles, caudales o pendientes de la superficie de agua. La rugosidad del sistema se determina con el coeficiente de rugosidad n de Manning, que puede ser espacialmente variable determinado por capas de uso de suelo o definiciones locales en arroyos o canales.

La modelación hidrológica simplificada se realiza a nivel de celda permitiendo seleccionar entre tres métodos: 1) Soil Conservation Service (SCS) – Curve Number (CN), 2) Deficit and Constant, y 3) Green–Ampt. El método CN del SCS, utilizado en este proyecto, estima el excedente de precipitación como una función de la precipitación acumulada, la cobertura y uso del suelo, y la humedad antecedente del suelo. Los requisitos de datos de entrada para el método CN del SCS en HEC-RAS son:

- Número de curva (*Curve Number*): valor escalar para cada celda.
- Relación de abstracción inicial (*Initial abstraction ratio*): valor escalar para cada celda [-].
- Duración del período de recuperación: solo se incluye al utilizar el método de recuperación (valor opcional para cada área 2D) [hr].
- Tasa de infiltración mínima (*Minimum infiltration rate*): valor opcional para cada celda [in/hr o cm/hr].

Los mapas espacialmente variables generan una ponderación por celda de los distintos parámetros establecidos en las capas ingresadas al modelo.

Para este estudio se utilizó la versión 6.6 del HEC-RAS que es la última disponible en forma definitiva (la versión 6.7 se encuentra en versión Beta).

4.2. Implementación del modelo

En este ítem se describe la implementación del modelo hidrodinámico, detallando la generación del dominio de modelación, el mallado, la caracterización del terreno, las variables hidrológicas e hidrodinámicas y los parámetros de simulación.

4.2.1. Dominio y condiciones de borde

El dominio de modelación comprende toda la cuenca de aporte de los cuatro arroyos mencionados en el Capítulo 1 y las localidades de Bahía Blanca, General Cerri e Ingeniero White (Figura 4.1). En este dominio se simulan los procesos hidrológicos de transformación lluvia-escorrentía acoplados al módulo hidrodinámico que resuelve el flujo superficial y encauzado.



Figura 4.1. Dominio de modelación y condición de borde.

Como forzantes del modelo se tiene a la lluvia distribuida en todo el dominio y la onda de marea del estuario de Bahía Blanca. Esta última condición se impone en el borde en el que coinciden el dominio y el estuario (Figura 4.1). En esta instancia de modelación no se considera la existencia de una condición inicial.

El forzante de precipitación tuvo en cuenta la distribución heterogénea del evento. Basado en los registros oficiales y la distribución e intensidad observada en otros puntos, se definió que en la

zona urbana se dieron acumulados máximos de 290 mm, mientras que en la alta cuenca este valor fue de 60 mm (ver Figura 4.2). El software HEC-RAS permite generar mapas interpolados de precipitación con pluviómetros distribuidos dentro y fuera del dominio de modelación. Los métodos de interpolación son: i) Polígonos de Thiessen, ii) Inversa de la distancia al cuadrado, iii) Inversa de la distancia al cuadrado restringida a los pluviómetros más cercanos y iv) Conservación del pico.

En primera instancia, se realizaron simulaciones incorporando los pluviómetros que poseen la serie de precipitaciones completa a paso de 5 minutos. En total eran 5 pluviómetros, 2 dentro de la ciudad de Bahía Blanca, y 3 en la zona de la Sierra de la Ventana, de los cuales uno solo se encontraba dentro del dominio de modelación. Las pruebas con los 4 métodos no fueron satisfactorias como se describe a continuación.

El método de los Polígonos de Thiessen generó discontinuidades en la precipitación que no resultan realistas para una modelación bidimensional con zonas de cambios discretos de 290 mm a 0 mm. En la Figura 4.2a se presenta el mapa generado para las 10:00 del 7 de marzo de 2025 donde en la cuenca alta comienza la precipitación, pero no en los pluviómetros que se encuentran fuera de la misma.

El método de Inversa de la distancia al cuadrado mostró una mayor continuidad en todo el dominio interpolando en cada paso temporal la precipitación. Los resultados demostraron que la precipitación en la zona de las sierras presentaba acumulados en zonas donde ello no ocurría. Esto se debía al peso excesivo que tenía la precipitación en Bahía Blanca por sobre el valor nulo hasta las 10 de la mañana en la zona de las sierras (Figura 4.2b). Este exceso de lluvias generaba caudales que no resultaban razonables comparando con los registros e imágenes de la zona de los cauces Napostá y Sauce Chico.

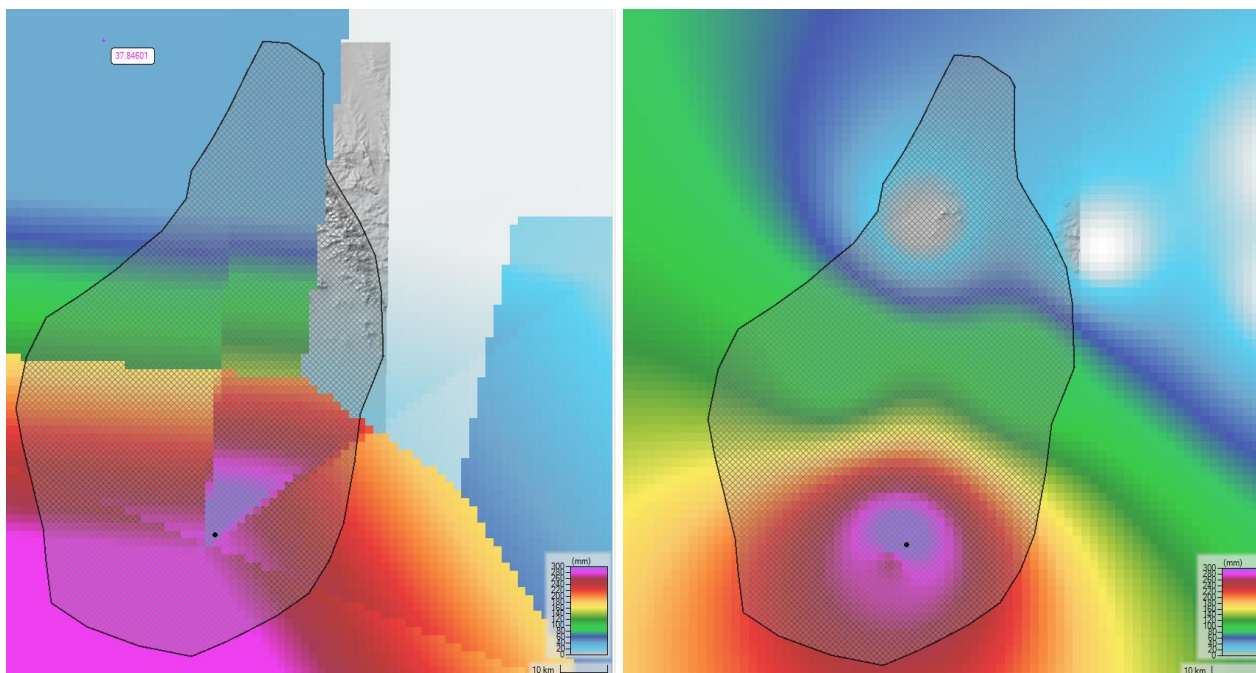


Figura 4.2. Distribución de precipitación en el modelo con a) Polígonos de Thiessen y b) Inversa de la Distancia al Cuadrado.

El método de Inversa de la distancia al cuadrado con la restricción de los pluviómetros cercanos no dio buenos resultados generando efectos similares al método de Polígonos de Thiessen, pero sin mejoras respecto al de método sin restricciones. De la misma forma, la metodología de Conservación del Pico tampoco generó buenos resultados y fue descartado.

Posteriormente, se implementaron pluviómetros virtuales en la zona intermedia y en la zona alta utilizando las series pluviométricas observadas corregidas con el monto acumulado, correspondiente a la isoyeta que se tenía con el SQPE-OBS de la Figura 2.14. Esto generó algunas mejoras, pero igualmente se observaron efectos indeseables de interpolación en las zonas altas con exceso de precipitación.

Finalmente se optó por generar una precipitación grillada a partir de una interpolación externa al HEC RAS. Para ello se implementó un código que permite generar una interpolación espacio-temporal de las series de precipitación con el método de inversa a la distancia a la potencia p en una malla de 4 km de resolución. Se realizaron algunos ensayos y se observó que con $p = 3$ los resultados eran satisfactorios, reduciendo el exceso de la precipitación en la zona media y alta sin el agregado de nuevos pluviómetros.

Con la información grillada se generó una serie pluviométrica en cada celda y se modificó automáticamente el archivo del modelo con datos pluviométricos incorporándose en el código. Luego se seleccionó el método de los Polígonos de Thiessen para reinterpolarse la información pluviométrica. En la Figura 4.3 se presenta la precipitación acumulada a las 9:00 (izquierda) y a las 22:00 (derecha) del 7 de marzo de 2025. En ambos casos se agregaron las isoyetas de la precipitación acumulada obtenidas con SQPE-OBS donde se observa un ajuste muy bueno.

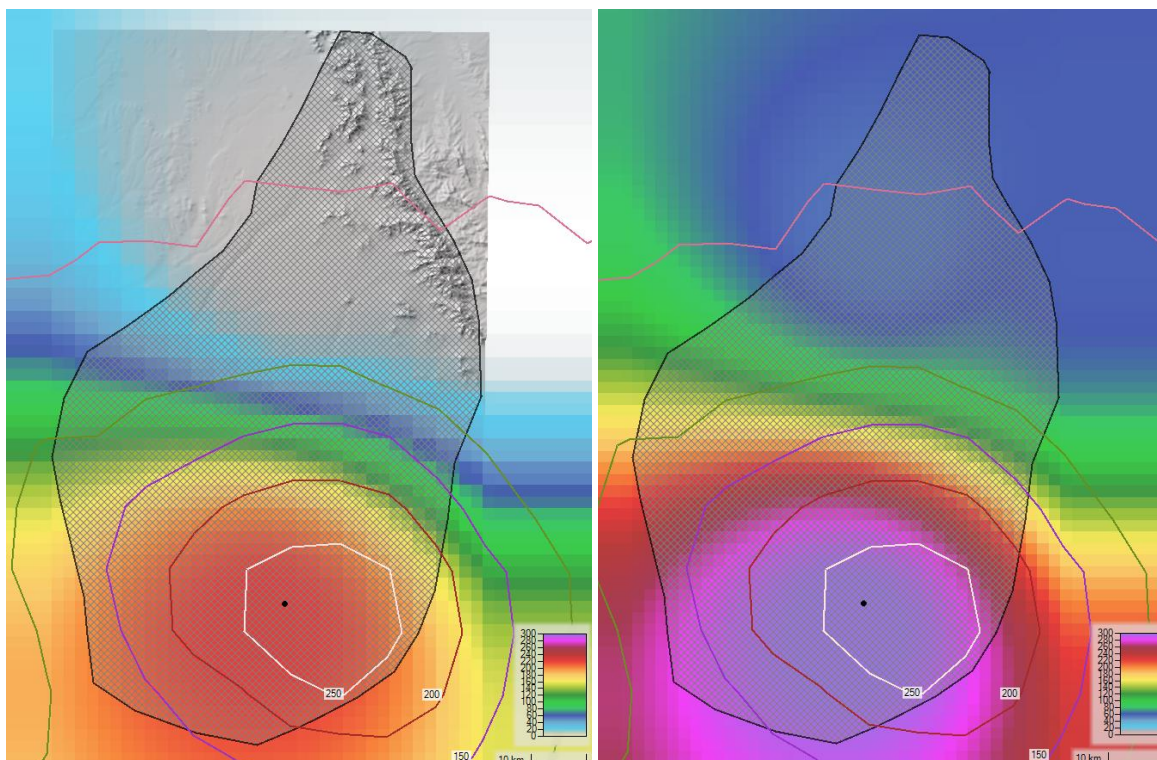


Figura 4.3. Distribución de precipitación utilizada en el modelo a las 09:00 y a las 22:00 del 7 de marzo de 2025 e isoyetas del SQPE-OBS.

4.2.2. Mallado

El modelo se implementó utilizando el módulo *RasMapper* que viene incorporado en el software HEC-RAS. Esta aplicación permite la definición del área de cálculo generando una malla que puede ser refinada localmente. Se generó una malla con celdas de 100 m de lado en la zona rural (Figura 4.4a) con refinamientos sobre los cursos de agua utilizando la función “*Breaklines*” que facilita una alineación de las celdas y el aumento de la resolución, a la vez que permiten una transición suave entre dos tamaños diferentes de celda.

En la zona urbana se utilizó la función “*Refinement Regions*” que permite cambiar el tamaño de las celdas en un área delimitada mediante un polígono creando una transición con las celdas del exterior. Allí las celdas se definieron con 20 m de lado y orientadas según el sentido de las calles, con refinamientos y reorientación de las celdas sobre calles diagonales de importancia (principalmente al sur del arroyo Napostá) (Figura 4.4b). Las celdas sobre los cursos de agua en zona rural se definieron de 20 m de lado repitiendo estos tamaños en las 5 celdas a cada lado de los cursos (Figura 4.4c), mientras que en las zonas urbanas los cursos tienen celdas de 10 m con igual esquema (Figura 4.4d). El tamaño final de la malla resultó de 1.2 millones de celdas.

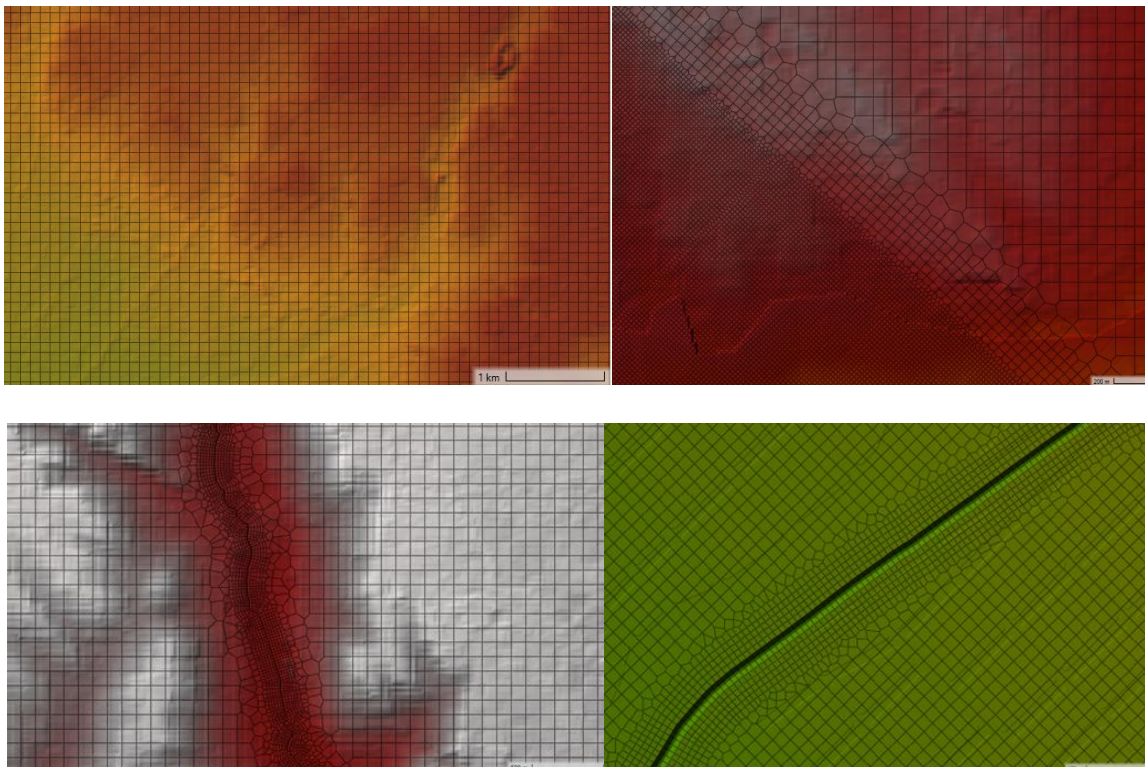


Figura 4.4. Mallado en el dominio de modelación: a) zona rural con celdas de 100 m, b) zona urbana con celdas de 20 m, c) cauces rurales con celdas de 20 m y d) cauces urbanos con celdas de 10 m.

4.2.3. Caracterización de elementos en el MDE

El MDE generado utilizando las tres fuentes mencionadas previamente (MERIT, Curvas topográficas IGN y Carta náutica SHN), por su escala espacial, no tiene representados detalles que

resultan esenciales para una correcta modelación hidrodinámica bidimensional. En esta etapa del estudio se realizó un procesamiento para incorporar al MDE los cauces rurales y urbanos de la red hídrica principal del sistema, y el alteo de las manzanas en la zona urbana incorporando la altura de las veredas.

Utilizando la función “*Modifications > Add modifications > Lines > Channel*” del RASMapper con una versión clonada del MDE, se procedió a generar los distintos cauces incorporando la geometría presentada en el ítem Red Hídrica. El perfil longitudinal de los cauces se implementó de forma manual buscando tener una pendiente similar al terreno natural del MDE (Figura 4.5).

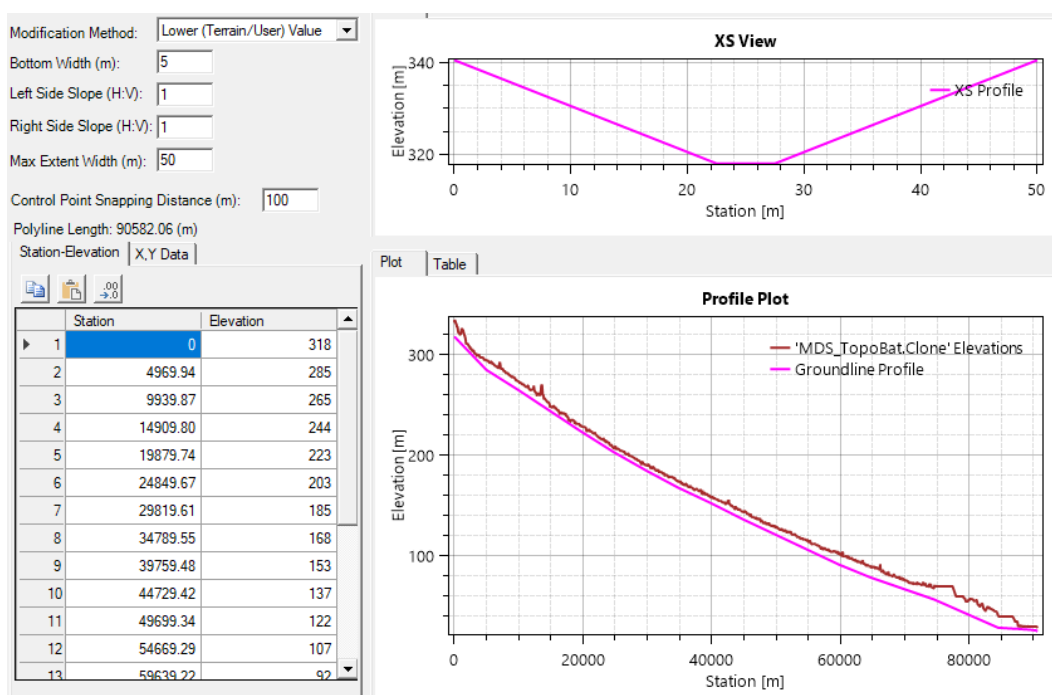


Figura 4.5. Procesamiento de cauces sobre el MDE en el HEC-RAS.

Otro elemento de importancia para la representación del escurrimiento del agua en la zona urbana es la caracterización de las zonas construidas. Para ello existen distintas metodologías, desde las más sofisticadas donde se cuenta con la geometría de las construcciones y la altura de las veredas en el MDE, hasta una adecuación del coeficiente de rugosidad de toda la zona urbana.

En esta etapa se implementó una solución intermedia que consiste en el alteo de las zonas donde existen construcciones urbanas (manzanas) elevando el terreno unos 20 cm que es aproximadamente la altura del cordón más la pendiente de la vereda hasta el ingreso a las casas. Al interior de las manzanas se impuso un coeficiente de rugosidad sensiblemente más elevado que representa el almacenamiento y la dificultad del escurrimiento dentro de las casas. Esto permite un mayor escurrimiento por las calles en detrimento del ingreso a la zona de las manzanas. Para esta caracterización se utilizó la capa con las manzanas de Bahía Blanca (disponible en <https://www.arba.gov.ar/geoarba/inicio.asp>) que fue modificada manualmente incorporando manzanas que se observaban construidas en las imágenes satelitales más recientes y eliminando las que no tenían construcciones. En RASMapper se utilizó la opción “*Modifications > Add modifications > Polygons > Multipoint*” y se copió el Feature de las manzanas previamente cargado en el modelo.

En la Figura 4.6 se observa el procesado en la zona de la bifurcación del arroyo Napostá con el canal Maldonado junto con el sistema de repartición de caudales para ambos cursos que también se implementó con la misma técnica. También se puede apreciar el alteo de las manzanas.



Figura 4.6. Redefinición de cauces y alteo de manzanas.

4.2.4. Mapas de uso de suelo

Entre los principales parámetros para la simulación hidrológica-hidráulica se encuentra la zonificación del uso de suelo, dado que el mismo impacta directamente sobre parámetros de rugosidad (y resistencia al escurrimiento superficial) e infiltración/abstracción en la transformación lluvia-esorrentía.

En este sentido, se deben diferenciar dos escalas: Cuenca y Ciudad. Para la escala Cuenca, donde el escurrimiento es a manto y concentrado en los cursos de agua, se emplearon los mapas de rugosidad parametrizados con el coeficiente n de Manning y de infiltración/abstracción que se muestran en la Figura 4.7. Los valores de referencia para estos parámetros se adoptaron a partir del uso del suelo y referencias bibliográficas.

En la escala de Ciudad, la zonificación tiene un mayor grado de detalle, ya que además de tener en cuenta la conducción por arroyos y canalizaciones, también se tiene en cuenta el amanzanamiento del ejido urbano (Figura 4.8). Para la rugosidad de las calles se adoptó un valor de n de Manning de 0.03, en zonas de parques o pastizales un valor de 0.05 y en las manzanas un valor de 0.20.

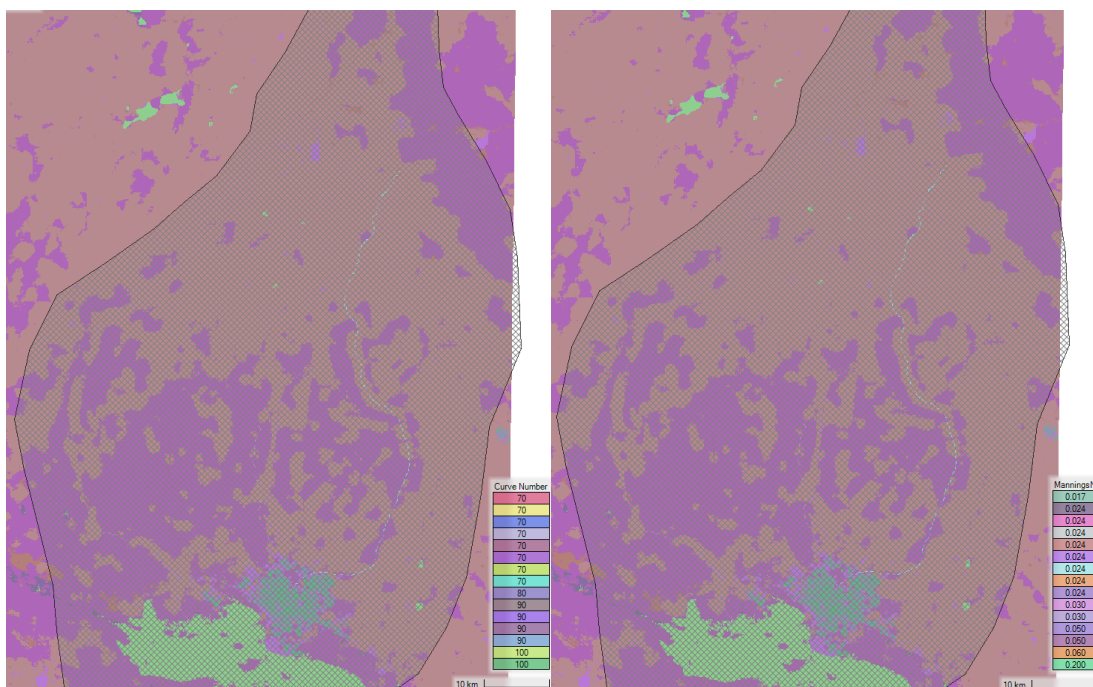


Figura 4.7. Mapas de rugosidad e infiltración-abstracción a escala cuenca.



Figura 4.8. Mapa de zonificación a escala Ciudad del coeficiente de rugosidad n de Manning

4.3. Proceso de calibración/validación

4.3.1. Parámetros de la simulación

Se resolvieron las ecuaciones diferenciales de Saint Venant 2D bajo la simplificación de Onda Difusiva, lo que permitió una correcta representación de la hidrodinámica a un costo computacional moderado. En relación a la estabilidad numérica, se limitó el paso de tiempo a 5

segundos. Para la escritura de resultados se adoptó un paso temporal de 30 min. Las opciones computacionales y tolerancias se mantuvieron las que vienen por defecto del software.

El período de simulación del evento inicia a las 04:00 am del día 7 de marzo de 2025 y finaliza a las 00:00 del día 9 de marzo de 2025. La simulación, en una computadora de alta performance de escritorio (AMD Ryzen 9 4900HS con 16 Gb de RAM DDR4) tiene una duración de unas 18 horas.

4.3.2. Calibración

El proceso de calibración se centró en el ajuste de los valores del coeficiente de rugosidad (n de Manning) e infiltración (CN, curva número) con el objetivo de poder captar la evolución del nivel de agua inferido a partir de videos en dos puntos diferentes. Por un lado, el ajuste de rugosidad permitió captar el tiempo al pico de máximo nivel de inundación, mientras que el ajuste sobre la infiltración determinó la altura máxima alcanzada.

Las series de nivel utilizadas para la calibración se ubican en dos en dos puntos cercanos al arroyo Napostá, aguas abajo de la bifurcación con el Canal Maldonado, y se referencian de la siguiente manera: Rotisería El Delirio y Farmacia Moscoso (Figura 4.9).

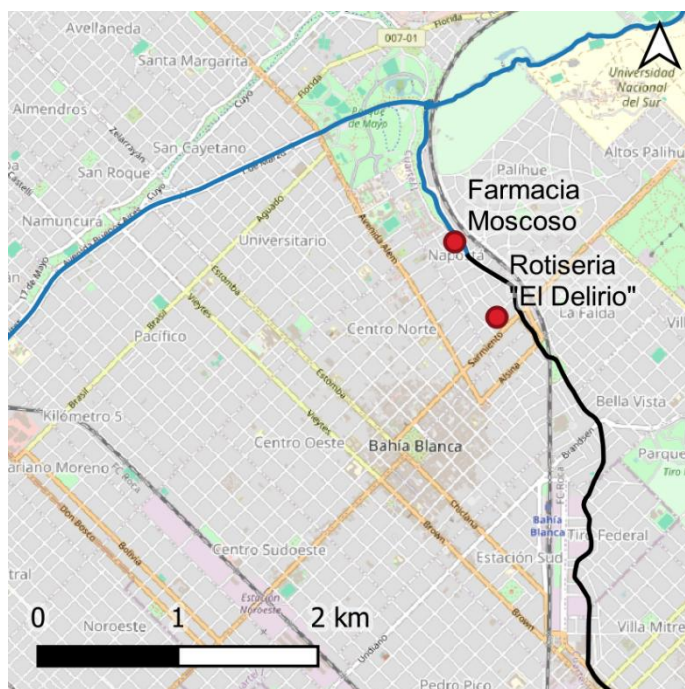


Figura 4.9. Ubicación de puntos de control para el proceso de calibración.

En ambos puntos se observa que el instante en el que se alcanza el pico de inundación, cercano al mediodía, es representado correctamente por el modelo hidrodinámico. El valor máximo alcanzado difiere en el punto de la Rotisería en menos de 10 cm, mientras que en la Farmacia el error es de 30 cm (Figuras 4.10 y 4.11). Si bien por un lado se destaca que estos resultados muestran un buen primer resultado, se indica que deberá seguir ajustándose el modelo, ya que la evolución de niveles posterior al pico de la inundación presenta un apartamiento mayor respecto en la recesión, siendo más lento en los resultados simulados.

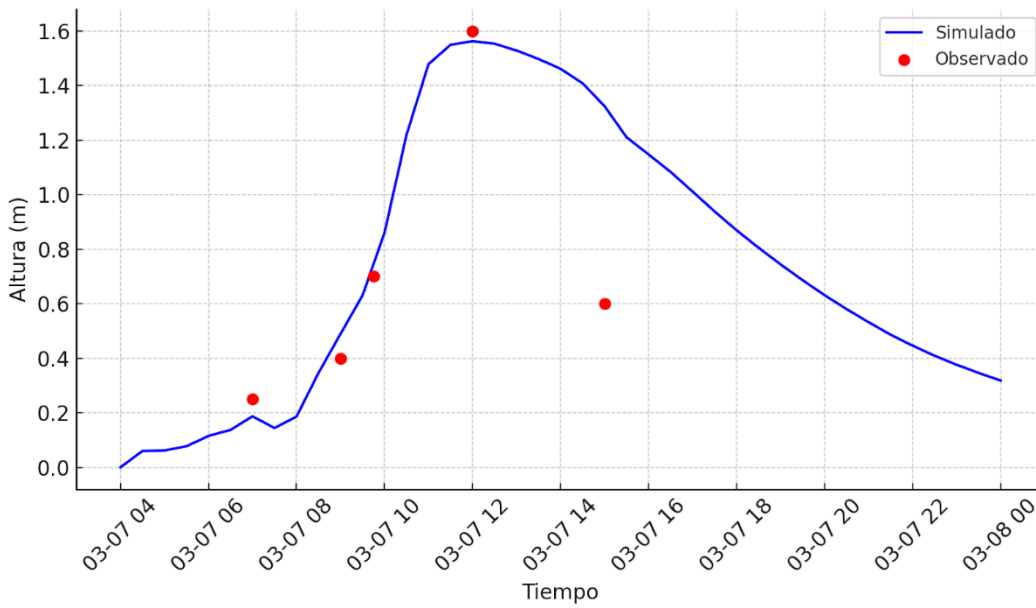


Figura 4.10. Comparación entre niveles simulados y observados en Rotisería El Delirio.

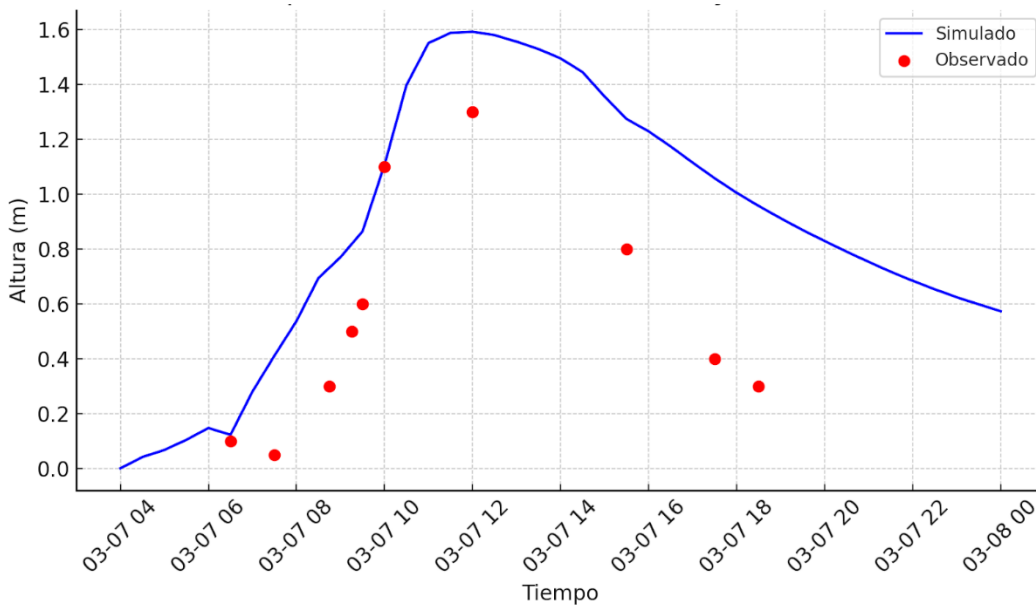


Figura 4.11. Comparación entre niveles simulados y observados en Farmacia Moscoso.

4.3.3. Validación

Para la validación se tuvieron en cuenta las marcas de agua (inundación máxima) y las velocidades estimadas a partir de videos mediante velocimetría por imágenes (técnica LSPIV). La Figura 4.12 muestra la comparativa entre los valores máximos registrados y los simulados. En primer lugar, se observa una dispersión de estos resultados, que tiene como origen principalmente en la incertidumbre del dato observado, y en la precisión de los datos base y la interpolación con la que se generó el MDE.

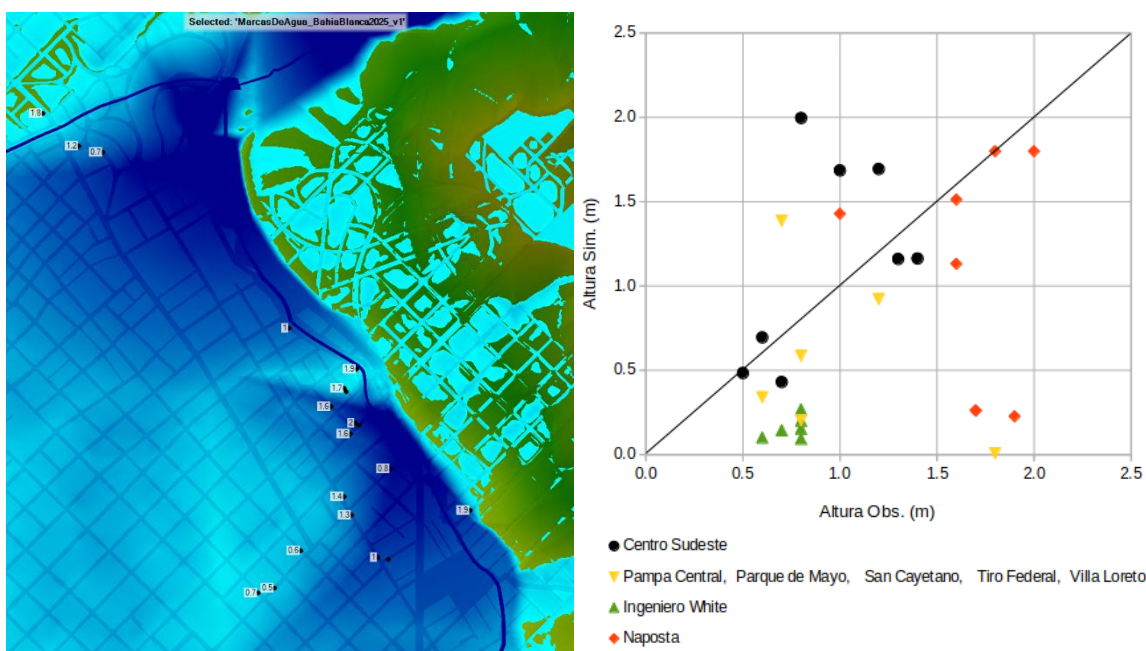


Figura 4.12. Comparación de alturas máximas de agua simuladas y observadas.

Otros elementos de validación han sido los videos procesados mediante la técnica LSPIV. A partir de esa información se comparó la velocidad superficial estimada respecto de la velocidad media simulada (promediada en la vertical). Si bien es esperable que las velocidades simuladas sean menores (por su característica de media), se observa que en general, a pesar de que las magnitudes están en el orden, los resultados simulados tienden a subestimar.

En el puente del Canal Maldonado y Agustín Álvarez se observa que las velocidades simuladas alcanzan máximos de 3 m/s (Figura 4.13), mientras que del procesamiento de imágenes surgen valores de hasta 5 m/s. Esto tiene su origen en una deficiencia en la representación del MDT en el partidor del arroyo Napostá y el Canal Maldonado, siendo que al momento de la elaboración del presente informe no se contó con información de la obra hidráulica. No obstante, se observa que inmediatamente aguas abajo (aproximadamente a 500 m) sí logran registrarse esas velocidades por el reingreso del escurrimiento desde las calles hacia el canal.

En el puente de Canal Maldonado y Castelli, a partir del procesamiento LSPIV la velocidad en coincidencia con el instante registrado en el video procesado, es próximo a 1 m/s (Figura 4.14), mientras que el valor registrado es de 2.5 m/s.

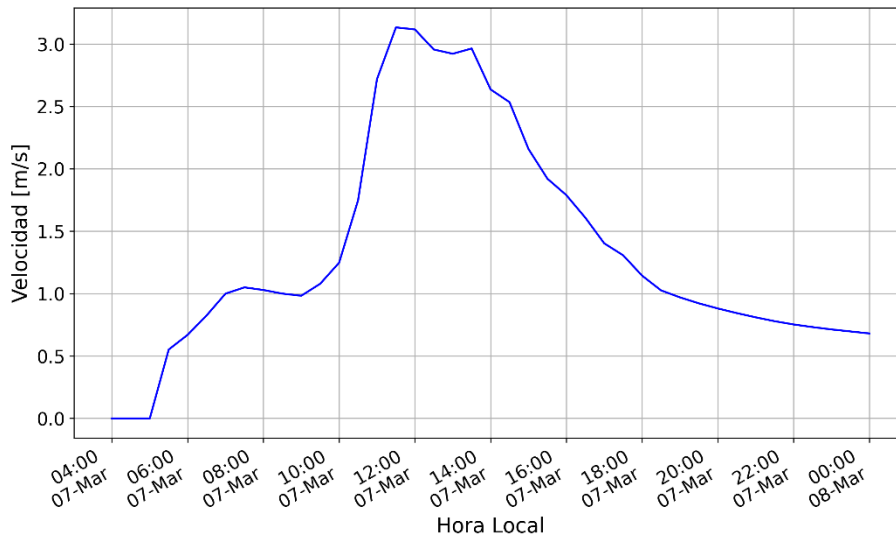


Figura 4.13. Velocidades simuladas en Canal Maldonado y Agustín Álvarez.

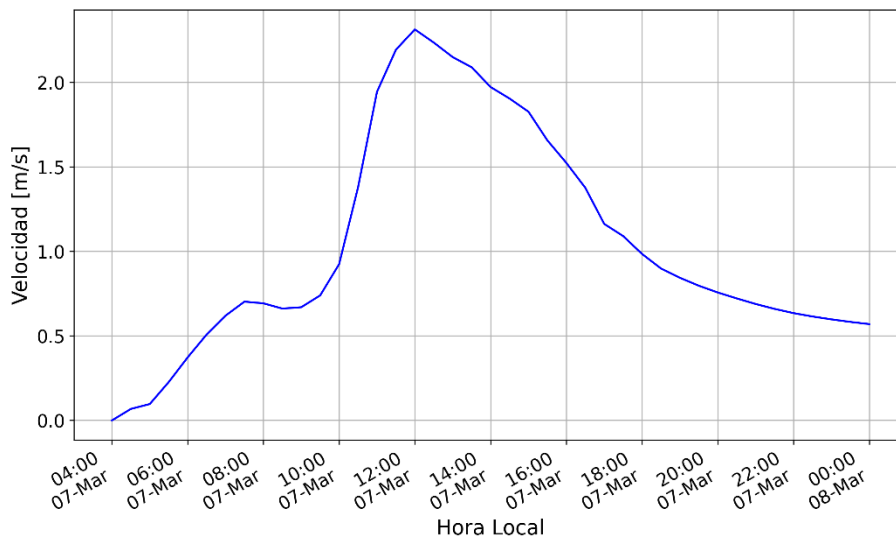


Figura 4.14. Velocidades simuladas en Canal Maldonado y Castelli.

4.4. Resultados preliminares

Teniendo en cuenta la calidad de los datos de entrada y limitaciones del modelo, se generó la simulación del evento del 7 de marzo de 2025 con las parametrizaciones surgidas del proceso de calibración y validación. Los principales resultados de esta simulación consisten en los campos y series de altura de inundación y velocidad del flujo.

En la Figura 4.15 se presenta el campo de alturas máximas de inundación en un sector del dominio de modelación centrado en la zona urbana. Se observa por un lado la compatibilidad de profundidades de inundación mayores en aquellos sitios donde se registró la mayor cantidad de marcas de inundación máxima, lo cual muestra una compatibilidad razonable entre

observaciones y simulación. También se destaca a simple vista, que el patrón de tirantes está fuertemente condicionado por el MDE, particularmente se identifican zonas en las que la interpolación podría ser mejorada si se contase con más y mejor información topográfica.

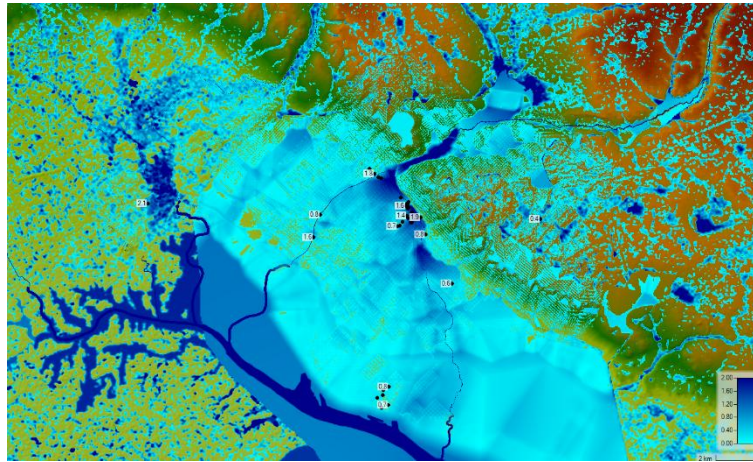


Figura 4.15. Velocidades simuladas en Canal Maldonado y Castelli.

En lo referido a las velocidades del flujo, se observan los principales patrones de comportamiento en la Figura 4.16, con concentración de flujo en las canalizaciones con magnitudes máximas de hasta 5 m/s, mientras que en las calles se reduce a valores entre 1 y 2 m/s.

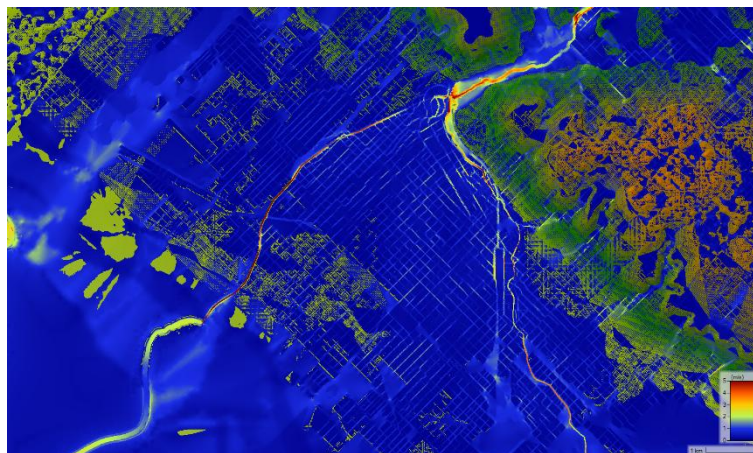


Figura 4.16. Velocidades simuladas en Canal Maldonado y Castelli.

Un zoom en la zona de mayor impacto en la ciudad de Bahía Blanca se presenta en la Figura 4.17. Allí se observan las direcciones principales del flujo y las altas velocidades alcanzadas en algunos sectores.

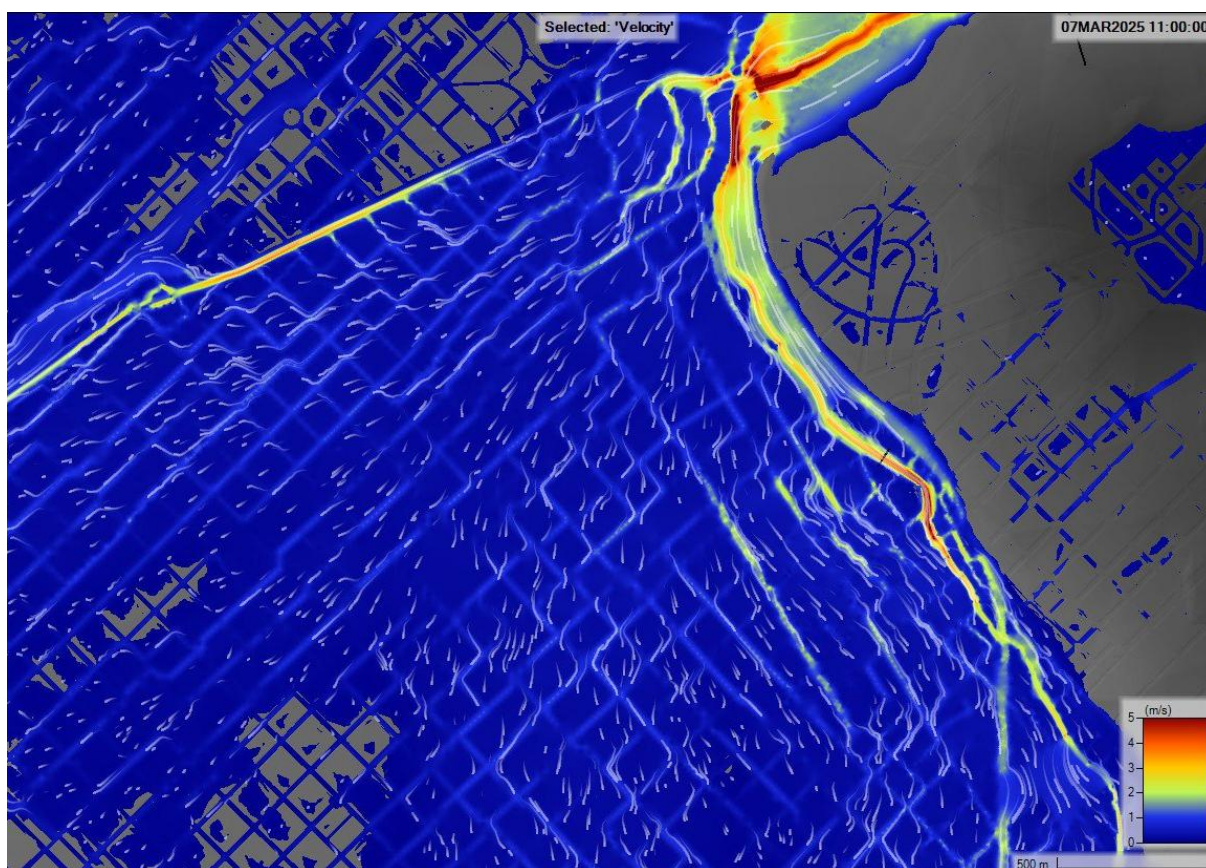


Figura 4.17. Velocidad máxima del flujo en la zona de mayor impacto en la localidad de Bahía Blanca.

5. CONCLUSIONES

Como un aporte en el contexto del después de la inundación de Bahía Blanca del 7 de marzo de 2025, desde el Laboratorio de Hidráulica del INA se facilitó la primera versión de un conjunto de herramientas que pueden colaborar con la comprensión de lo sucedido y con la gestión de acciones prioritarias para la reconstrucción de la ciudad.

En apenas tres semanas de trabajo, un conjunto de profesionales del Laboratorio de Hidráulica logró poner a disposición una serie de instrumentos de la hidrología y la hidráulica que permiten analizar el evento de inundación. Aún con las limitaciones que el acceso a información de base impuso, se implementó un modelo numérico bidimensional de las cuatro cuencas de Bahía Blanca y su entorno, calibrado y validado a partir de información colectada de redes sociales.

Con el objetivo de favorecer el intercambio de conocimiento y la discusión en torno a esta situación, desde el Laboratorio de Hidráulica se disponibilizan libremente estas herramientas. De esta manera, a través de la página web del INA y de un repositorio en línea se comparte el modelo numérico bidimensional y la información sistematizada relativa al modelo digital del terreno construido, la información pluviométrica colectada, las alturas máximas de inundación y las estimaciones de velocidad en los cauces.

El modelo implementado, a pesar del estadio de desarrollo que presenta, permite contestar diferentes preguntas que pueden resultar de interés (duración de la inundación según umbrales, detección de zonas de mayor velocidad del flujo, cuantificación de procesos erosivos, entre otras).

Este modelo requiere ser mejorado y algunos de los elementos que posibilitarían esa situación serían los siguientes:

- Definición precisa de la geometría de las secciones transversales de los conductos, canales y arroyos de la red hídrica de Bahía Blanca y su entorno.
- Precisión sobre las dimensiones y el funcionamiento del partidor del arroyo Napostá y el canal Maldonado.
- Redefinición del Modelo Digital del Terreno, específicamente en la zona urbana. La incorporación de información de cotas de esquina y relevamientos topográficos específicos sería de suma utilidad (LiDAR, aerofotogrametría, etc.).
- Reinterpretación de la variación espacial y temporal de la precipitación ocurrida durante el evento.
- Incorporación de nuevos registros de marcas máximas de inundación en otras áreas, al momento se cuenta con una representación aceptable el entorno del Parque de Mayo, el barrio Napostá y la localidad de Ingeniero White.

INUNDACIÓN DE BAHÍA BLANCA – 7 de marzo de 2025

Esta experiencia breve de implementación de un modelo hidrodinámico de un sistema urbano en el contexto del después inmediato de una inundación urbana significativa permitió identificar que tipos de insumos deberían las ciudades poner a disposición para que ante situaciones críticas puedan desde el ámbito de la comunidad hídrica surgir elementos de apoyo a la toma de decisiones (modelo digital del terreno de alta resolución, sistema hídrico georreferenciado y con dimensiones, entre otras).

Se destaca, además, que gran parte de la información utilizada en este trabajo del INA corresponde a servicios provistos por otros organismos nacionales de ciencia y tecnología (IGN, SMN y SHN). Esto remarca la importancia de contar con instituciones públicas que cuenten con la experiencia necesaria para realizar este tipo de estudios y realizar aportes significativos en situaciones críticas como la de este caso.

REFERENCIAS

Hobouchian, M.P., García Skabar, Y., Barrera, D., Vila, D., Salio, P., 2014. Estimación de precipitación por satélite aplicando la técnica Hidroestimador en su versión para Sudamérica. IFRH 2016, Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos, Instituto Nacional del Agua, Ezeiza, Argentina.

Hobouchian, M.P., Diaz, G., Vidal, L., García Skabar, Y., Ferreira, L., Maas, M., Rossi Lopardo, M.S., Veiga, H., Rugna, M., 2021. Ajuste de la estimación de precipitación satelital IMERG con observaciones pluviométricas en Argentina. Nota Técnica SMN 2021-105.

Le Coz, J., Jodeau, M., Hauet, A., Marchand, E., 2014. Image-based velocity and discharge measurements in field and laboratory river engineering studies using the free FUDAA-LSPIV software. <http://dx.doi.org/10.1201/b17133-262>

Patalano, A., García, C.M., Rodríguez, A., 2017. Rectification of Image Velocity Results (RIVER): A simple and user-friendly toolbox for large scale water surface Particle Image Velocimetry (PIV) and Particle Tracking Velocimetry (PTV). <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.07.009>

Re, M., Kazimierski, L.D., Badano, N.D., 2019. High-resolution urban flood model for risk mitigation validated with records collected by the affected community. Journal of Flood Risk Management, 12 (S2), e12524. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12524>

Re, M., Kazimierski, L.D., García, P.E., Ortiz, N.E., Lagos, M., 2022. Assessment of crowdsourced social media data and numerical modelling as complementary tools for urban flood mitigation. Hydrological Sciences Journal, 67 (9). <https://doi.org/10.1080/02626667.2022.2075266>

Señas, L., Priano, C., Maiza, P., Marfi, S., 2005. Evaluación del deterioro en el hormigón del Canal Aliviador Maldonado (Bahía Blanca, Argentina). Simposio “El Hormigón estructural y el Transcurso del Tiempo”, La Plata 2005

SMN, 2025. Informe especial del evento meteorológico 4-8 de marzo de 2025. Servicio Meteorológico Nacional, Buenos Aires.

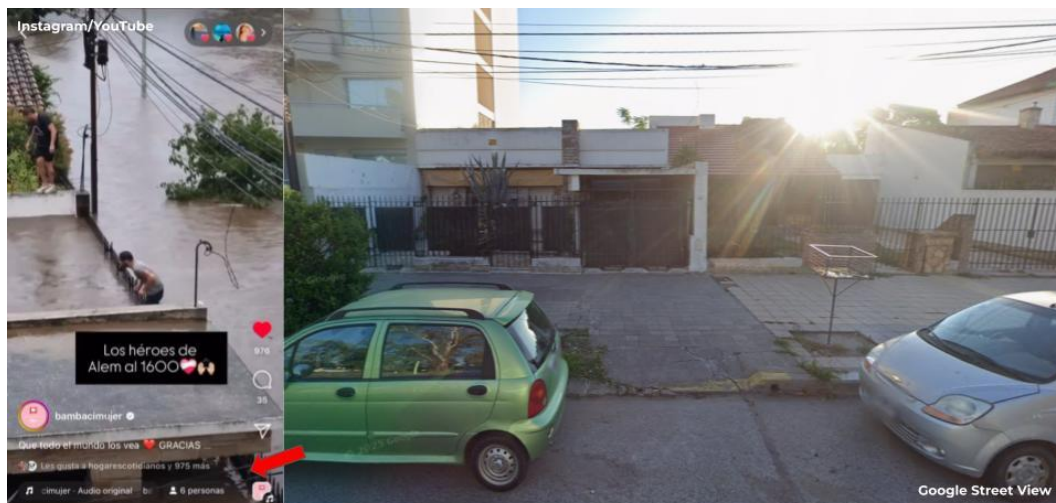
Zapperi, P.A., Aldalur, B., Campo, A.M., Jelinsky, G., Crisafulli, M., 2016. Redes de drenaje superficial a partir de Modelos Digitales de Elevación para determinar áreas críticas de evacuación ante eventos de inundación en la ciudad de Bahía Blanca. IFRH 2016, Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos, Instituto Nacional del Agua, Ezeiza, Argentina.

ANEXO I

Marcas de inundación máxima



Marca #01 | Soler 87 (Bahía Blanca) | 0.70 m



Marca #02 | Alem 1630 (Bahía Blanca) | 1.80 m



Marca #03 | Corrientes 64 (Bahía Blanca) | 1.40 m



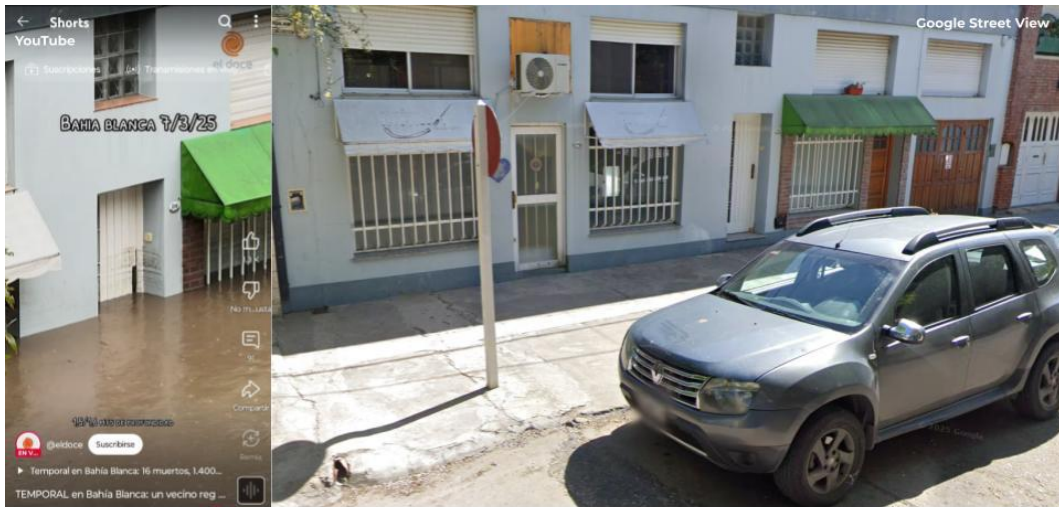
Marca #04 | Corrientes 131 (Bahía Blanca) | 1.30 m



Marca #05 | Corrientes 289 (Bahía Blanca) | 1.00 m



Marca #06 | Sarmiento 802 (Bahía Blanca) | 2.00 m



Marca #07 | Florencio Sanchez 210 (Bahía Blanca) | 1,60 m



Marca #08 | Urquiza 260 (Bahía Blanca) | 1,90 m



Marca #09 | Juan José Paso y Alem (Bahía Blanca) | 1,20 m



Marca #10 | Las Heras 619 (Bahía Blanca) | 1,20 m



Marca #11 | Bahía Blanca 193 (General Cerri) | 2,10 m



Marca #12 | Avenida La Plata 1774 (Bahía Blanca) | 1,60 m



Marca #13 | Belgrano y Siches (Ingeniero White) | 0,70 m



Marca #14 | Sarmiento 824 (Bahía Blanca) | 1,80 m



Marca #15 | Alem 1876 (Bahía Blanca) | 0,80 m



Marca #16 | Alsina 255 (Bahía Blanca) | 0,50 m



Marca #17 | Avenida La Plata y Malvinas (Bahía Blanca) | 0.80 m



Marca #18 | Alsina 777 (Bahía Blanca) | 0.80 m



Marca #19 | Juan José Paso 1441 (Bahía Blanca) | 0.70 m



Marca #20 | Solís 813 (Bahía Blanca) | 1,90 m



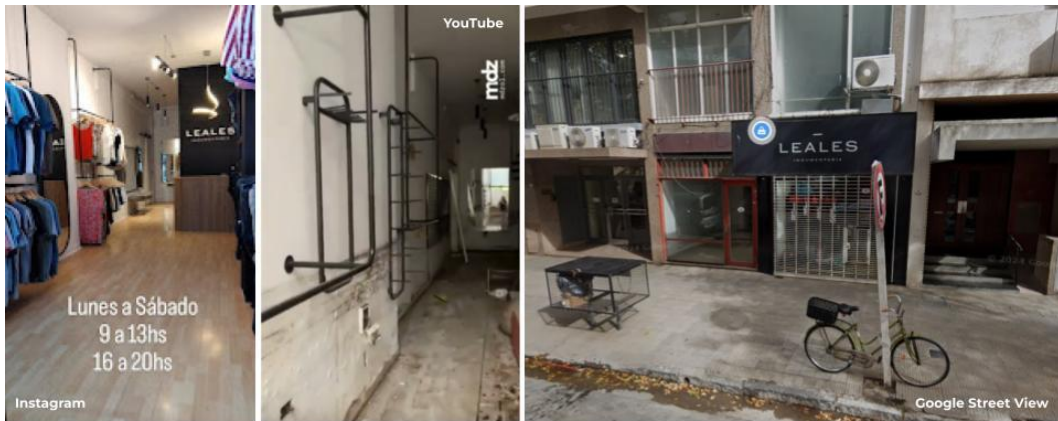
Marca #21 | Plumerillo 2533 (Bahía Blanca) | 0,60 m



Marca #22 | Magallanes 3897 (Ingeniero White) | 0,80 m



Marca #23 | Magallanes y Cabral (Ingeniero White) | 0,80 m



Marca #24 | Dorrego 83 (Bahía Blanca) | 0.60 m



Marca #25 | San Salvador 267 (Bahía Blanca) | 1.70 m



Marca #26 | Sarmiento 778 (Bahía Blanca) | 1.60 m



Marca #27 | General Urquiza 544 (Bahía Blanca) | 1.20 m



Marca #28 | Ayolas 800 (Bahía Blanca) | 0.80 m



Marca #29 | San Salvador 217 (Bahía Blanca) | 1.70 m



Marca #30 | Carrega y Avenente (Ingeniero White) | 0.80 m



Marca #31 | Sisco 3263 (Ingeniero White) | 0.60 m



Marca #32 | Indiada 4112 (Bahía Blanca) | 0.40 m



Marca #33 | San Martín y Vélez Sarsfield (Ingeniero White) | 0.80 m