

Centro de soporte HydroBID

Integración de HydroBID Flood con el modelo EPA SWMM para simulaciones de drenaje urbano en la Municipalidad de Santa Fe, Argentina

Autores:

Pablo Cello
Reinaldo García
Mauro Nalesso

División de Agua y Saneamiento

NOTA TÉCNICA N°
IDB-TN-2413

Enero 2022



BID

Banco Interamericano
de Desarrollo

Centro de soporte HydroBID

Integración de HydroBID Flood con el modelo EPA SWMM para simulaciones de drenaje urbano en la Municipalidad de Santa Fe, Argentina

Autores:

Pablo Cello
Reinaldo García
Mauro Nalesso

Banco Interamericano de Desarrollo
División de Agua y Saneamiento

Enero 2022

**Catalogación en la fuente proporcionada por la
Biblioteca Felipe Herrera del
Banco Interamericano de Desarrollo**

Cello, Pablo.

Centro de soporte HydroBID: Integración de HydroBID Flood con el modelo EPA SWMM para simulaciones de drenaje urbano en la Municipalidad de la Ciudad de Santa Fe, Argentina / Pablo Cello, Reinaldo García, Mauro Nalesso-Mauron.

p. cm. — (Nota técnica del BID ; 2413)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Water resources development-Argentina-Databases. 2. Watershed management-Argentina-Computer simulation. 3. Flood damage prevention-Argentina-Computer simulation. 4. Climatic changes-Environmental aspects-Argentina. I. García, Reinaldo. II. Nalesso, Mauro. III. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Agua y Saneamiento. IV. Título. V. Serie.

IDB-TN-2413

Palabras clave: Inundaciones, HydroBID Flood, modelos numéricos, drenaje urbano, resiliencia, planificación, innovación.

Códigos JEL: Q1, Q54, Q55, O54, O33, C63

<http://www.iadb.org>

Copyright © [2022] Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no-comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas.

Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.





BID

Banco Interamericano
de Desarrollo

Centro de soporte HydroBID

Integración de HydroBID Flood con el modelo EPA SWMM
para simulaciones de drenaje urbano en la
Municipalidad de la Ciudad de Santa Fe, Argentina

TABLA DE CONTENIDO

A	AGRADECIMIENTOS	4
1	1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	8
2	2. HYDROBID FLOOD	11
3	3. PROGRAMA DE TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA SOBRE EL USO DEL MODELO HYDROBID FLOOD	15
4	4. APLICACIÓN DEL MODELO HYDROBID FLOOD A CASOS ESTUDIO, SELECCIONADOS POR EL PERSONAL PROFESIONAL DE LA MUNICIPALIDAD DE LA CIUDAD DE SANTA FE ARGENTINA	18
	4.1 INTRODUCCIÓN	19
	4.1.1 Descripción general del área del estudio	19
	4.1.2 Descripción del problema de inundaciones urbanas en la ciudad de Santa Fe	22
	4.2 MONITOREO DE LA INFORMACIÓN METEOROLÓGICAS E HIDROMÉTRICA QUE SE GENERA EN LA ZONA DEL ESTUDIO	
	4.3 IMPLEMENTACIÓN Y APLICACIÓN DEL MODELO HYDROBID FLOOD, EN LAS CUENCAS ESTADO DE ISRAEL Y DEL BARRIO TRANSPORTE UBICADO EN LA CABECERA DE LA CUENCA FLORES	27
	4.3.1 Características de la modelación hidrodinámica del escurrimiento superficial en el dominio de cálculo de las cuencas urbanas bajo estudio, utilizando el módulo de drenaje urbano UD del modelo HydroBID Flood	27
	4.3.2 Definición de los casos estudios analizados utilizando el Modelo HydroBID Flood	27
	4.3.3 Preparación de la información básica requerida para llevar a cabo las simulaciones correspondientes a los cuatro casos estudios considerados en el análisis	31
	4.3.4 Características de la cuenca Estado de Israel y de la infraestructura que conforma el sistema de drenaje urbano existente. Caso 1 - Escenario de Referencia	32

TABLA DE CONTENIDO

4.3.5	Características de la intervención en la cuenca Estado de Israel mediante la adopción de una medida estructural. Caso 2 - Escenario medida estructural	36
4.3.6	Características de la parte alta de la cuenca Flores, donde se localiza el Barrio Transporte. Caso 3 - Escenario de Referencia	37
4.3.7	Caso 4. Intervención del Barrio Transporte incluyendo una medida estructural	42
4.3.8	Análisis de los resultados obtenidos a través de la aplicación del modelo HydroBID Flood	43
4.4	PROPUESTA DE CORRECCIÓN DEL MODELO MDH A LOS FINES DE MEJORAR LA GEOMETRÍA DE LAS CALZADAS DEL SISTEMA VIAL UTILIZANDO MODELOS 3D	57
4.5	CONCLUSIONES	59
5	5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
6	ANEXO 1. PROCESO DE TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA	64
6.1	CARACTERÍSTICAS DE LOS MÓDULOS	65
6.1.1	Módulo I	65
6.1.2	Módulo II	65
6.2	TALLERES DE CAPACITACIÓN GUIADA SOBRE EL USO DEL MODELO HYDROBID FLOOD EN LA MUNICIPALIDAD DE SANTA FE, ARGENTINA	66
6.3	INSTRUCTORES	66
6.4	UBICACIÓN	66
6.5	AGENDA DETALLADA	67



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mallas triangulares flexibles	12
Figura 2: Interfaz de usuario en QGIS	13
Figura 3: Representación de mapa de profundidades	13
Figura 4: Ubicación de la provincia y de la ciudad de Santa Fe Argentina. Fuente: Cello P. (2021)	19
Figura 5: Delineación de cuencas urbanas y ubicación de los sitios de operación del sistema de drenaje urbano. Fuente: Cello P. (2021)	20
Figura 6: Detalle de la delineación de la cuenca Estado de Israel y de la cuenca Flores. Fuente: Cello P. (2021)	21
Figura 7: Ubicación del reservorio donde ingresan los excedentes de aguas de lluvia que se generan en las cuencas del Estado de Israel y Flores. Ubicación de la estación de bombeo y alcantarilla que permiten la descarga en el Río Salado. Fuente: Cello P. (2021)	22
Figura 8: Sección transversal desde la margen Oeste hasta la margen Este de la ciudad de Santa Fe. Fuente: Cello et al. (2021)	23
Figura 9: Fotografías que muestran el efecto de las inundaciones fluviales que se produjeron en el año 2003 debido al desborde del río Salado sobre la margen Oeste de la ciudad de Santa Fe. Fuente: Cello et al. (2021)	23
Figura 10: Fotografías que muestran el efecto de las inundaciones pluviales que se produjeron en el año 2007 debido a la ocurrencia de una tormenta extrema durante el período 26 de marzo al 4 de abril, sobre la ciudad de Santa Fe. Fuente: Cello et al. (2021)	24
Figura 11: Fotografías que muestran el efecto de las inundaciones pluviales que se produjeron en el año 2019 debido a la ocurrencia de una tormenta extrema durante los días 14 y 15 de diciembre, sobre la ciudad de Santa Fe. Fuente: Cello et al. (2021)	24
Figura 12: Sitios donde se realizaron reclamos por parte de los habitantes de la zona debido al efecto de las inundaciones pluviales que se produjeron en el año 2019 debido a la ocurrencia de una tormenta extrema durante los días 14 y 15 de diciembre, sobre la ciudad de Santa Fe. Fuente: Cello P. (2021)	25
Figura 13: Ubicación de las estaciones meteorológicas e hidrométricas identificadas como urbanas. Fuente: Cello et al. (2021)	26
Figura 14: Ubicación de las estaciones meteorológicas e hidrométricas identificadas como suburbanas. Fuente: Cello et al. (2021)	26
Figura 15: Modelo Digital Híbrido y puntos relevados en el terreno. Fuente: Cello et al. (2021)	29
Figura 16: Localización de puntos identificados en la red pluvial para su relevamiento. Fuente: Cello et al. (2021)	30
Figura 17: Hietograma de diseño para una recurrencia de 2 años y una duración de 120 minutos. Fuente: Cello et al. (2021)	31

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 18: Dominio de cálculo y condiciones de borde superficiales. Cuenca Estado de Israel. Fuente: Cello et al. (2021)	32
Figura 19: Malla de cálculo utilizada en la cuenca Estado de Israel. Fuente: Cello et al. (2021)	33
Figura 20: Definición de los valores del Número de la Curva y los polígonos asociados. Fuente: Cello et al. (2021)	34
Figura 21: Definición de los valores del coeficiente de rugosidad de Manning y los polígonos asociados. Fuente: Cello et al. (2021)	34
Figura 22: Definición del polígono asociado al hietograma de la tormenta de diseño. Fuente: Cello et al. (2021)	35
Figura 23: Representación del sistema de colectores de drenaje en EPA-SWMM. Fuente: Cello et al. (2021)	35
Figura 24: Colector J.P López y conductos secundarios en la cuenca Estado de Israel. Fuente: Cello et al. (2021)	36
Figura 25: Dominio de cálculo considerado en el Caso 2, en la cuenca Estado de Israel. Fuente: Cello et al. (2021)	37
Figura 26: Dominio de cálculo considerado en el Caso 3, en la zona que contiene al Barrio Transporte. Fuente: Cello et al. (2021)	38
Figura 27: Capas de densificación y malla de volúmenes finitos, modelo del Barrio Transporte. Fuente: Cello et al. (2021)	39
Figura 28: Zonificación del parámetro del CN del SCS para la estimación de la precipitación efectiva y las abstracciones por infiltración. Subcuenca del Barrio Transporte. Fuente: Cello et al. (2021)	40
Figura 29: Zonificación del coeficiente de rugosidad n de Manning. Subcuenca del Barrio Transporte. Fuente: Cello et al. (2021)	40
Figura 30: Definición del polígono asociado al hietograma de la tormenta de diseño. Subcuenca del Barrio Transporte. Fuente: Cello et al. (2021)	41
Figura 31: Red de drenaje representada para la subcuenca del Barrio Transporte. Fuente: Cello et al. (2021)	41
Figura 32: Extensión de la red de drenajes pluviales en el Barrio Transporte. Fuente: Cello et al. (2021)	43
Figura 33: Almacenamiento superficial al cabo de 12 horas de simulación en la zona este. Zona delimitada por la cabecera de la cuenca Estado de Israel y Avenida Peñaloza al oeste. Fuente: Cello et al. (2021)	44
Figura 34: Almacenamiento superficial al cabo de 12 horas de simulación en la zona oeste. Zona delimitada por la Avenida Peñaloza al este y la Avenida Circunvalación. Fuente: Cello et al. (2021)	45
Figura 35: Comparación zonas críticas INA (2015) vs anegamientos simulados por el modelo. Fuente: Cello et al. (2021)	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 36: Áreas afectadas por el anegamiento en el sector cabecera de la cuenca Estado de Israel. Fuente: Cello et al. (2021)	46
Figura 37: Áreas afectadas por el anegamiento en el sector oeste de la cuenca Estado de Israel. Fuente: Cello et al. (2021)	47
Figura 38: Dinámica del proceso de inundación en un sector urbanizado ubicado en la cabecera de la cuenca Estado de Israel. Fuente: Cello et al. (2021)	48
Figura 39: Perfil de la cota de agua que se genera en el conducto Hernandarias durante el tránsito del caudal máximo. Cuenca Estado de Israel. Fuente: Cello et al. (2021)	49
Figura 40: Descarga por gravedad desde el reservorio hacia el Río Salado. Cuenca Estado de Israel. Fuente: Cello et al. (2021)	49
Figura 41: Efecto del Colector J.P López y conductos secundarios sobre las profundidades de inundación a las 12 horas de simulación. Cuenca Estado de Israel. Fuente: Cello et al. (2021)	50
Figura 42: Detalle del área drenada por el colector J.P. López y conductos secundarios. Escenario de Intervención, cuenca Estado de Israel. En la imagen izquierda situación antes de la construcción de la obra y en la derecha situación después de la construcción. Fuente: Cello et al. (2021)	51
Figura 43: Almacenamiento superficial generado después de 12 horas de simulación, en el dominio de cálculo que incluye el Barrio Transporte. Fuente: Cello et al. (2021)	52
Figura 44: Comparación zonas críticas INA (2015) vs. Anegamientos simulados por el modelo. Barrio Transporte. Fuente: Cello et al. (2021)	52
Figura 45: Evolución del anegamiento durante el evento de precipitación. Barrio Transporte. Fuente: Cello et al. (2021)	53
Figura 46: Almacenamiento superficial al cabo de 12 hs. de simulación. En traza amarilla se indican los conductos existentes y en traza verde los conductos proyectados. Barrio Transporte. Fuente: Cello et al. (2021)	55
Figura 47: Comparación Escenario de Referencia (a) vs. Escenario con colectores proyectados (b). Impactos en el entorno de los colectores que descargan al Azcuénaga, al Ayacucho y al Genesis. Barrio Transporte. Fuente: Cello et al. (2021)	56
Figura 48: Comparación Escenario de Referencia (a) vs. escenario con colectores proyectados (b). Impacto del subsistema de colectores J. de la Rosa - Genesis sobre el entorno de la avenida Facundo Zuviría entre Javier de la Rosa y Risso. Barrio Transporte. Fuente: Cello et al. (2021)	56
Figura 49: Visualización 3D del producto generado. Fuente: Cello et al. (2021)	58

AGRADECIMIENTOS

Esta publicación resume el trabajo realizado por los equipos técnicos del Hydronia LLC, la Municipalidad de la Ciudad de Santa Fe, Argentina y del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) como parte de la consultoría dirigida al desarrollo y evaluación de la integración del modelo HydroBID Flood con el modelo EPA SWMM para el análisis y diseño de sistemas de drenaje urbano, a través de un proceso de implementación guiada y transferencia tecnológica, parte de la cooperación técnica no reembolsable: Centro de Soporte HydroBID para la Gestión de los Recursos Hídricos en ALC (RG-T3602).

Los autores de esta publicación agradecen el apoyo y el esfuerzo brindado tanto por Emilio Jatón, Intendente de la Ciudad de Santa Fe, como por Silvana Serra, Secretaria de Asuntos Hídricos y Gestión de Riesgos, por creer en el proyecto y por el apoyo y esfuerzo brindado para llevarlo a cabo.

Agradecemos también el esfuerzo realizado por parte del equipo técnico de la Secretaría de Asuntos Hídricos y Gestión de Riesgos de la Municipalidad de la Ciudad de Santa Fe (M.P. Gagliardi, M. Morell, S. Mendizabal, G. Quiroga, R. Salvadores, A. Burne y S. Serra); el equipo técnico de Hydronia LLC (J.R. Córdova, J. Artigas, P. García-Navarro y J. Fernandez-Pato) gracias a quienes se ha dado un paso importante en avanzar a través de la tecnología para el desarrollo de planes maestros de drenaje resilientes que ayuden a mitigar los riesgos por inundaciones urbanas.



1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES



Las pérdidas socioeconómicas debidas a tormentas intensas en áreas urbanas constituyen un problema muy serio a nivel mundial (Schomwandt et al., 2016; Etulain and López, 2017; Bertoni et al., 2004; González et al., 2015; Paoli, 2015). Informes recientes sugieren que las 2 causas principales que promueven el incremento del número de desastres de origen hidrometeorológicos son, la existencia de anomalías en el comportamiento de los patrones de la lluvia asociadas al cambio climático y la consolidación acelerada y descontrolada de escenarios de vulnerabilidad rural y/o urbana (López, 2020).

La Ciudad de Santa Fe, capital de la homónima provincia en la región centro-oriental de la República Argentina no escapa de esta realidad. Ubicada en la confluencia de los ríos Salado y el sistema Setúbal (Río Paraná), la ciudad ha sufrido el avance de la urbanización sobre los espacios verdes propiciando la impermeabilización del suelo lo que, unido a la limitada capacidad de descarga de las redes de drenaje ha resultado en un aumento de las inundaciones en determinadas áreas.

Para responder a estos problemas y promover la adaptación a los efectos del cambio climático, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) promueve el diseño de infraestructura resiliente ya que las inversiones en resiliencia realizadas antes de que ocurra un desastre reducen los daños a los activos de infraestructura y minimizan las perturbaciones en los servicios, evitando pérdidas económicas para personas y empresas (BID, 2020).

El objetivo principal de esta consultoría correspondió al desarrollo e implementación de un programa de transferencia tecnológica y acompañamiento dirigido al personal profesional de la Municipalidad de la ciudad de Santa Fe en Argentina, sobre el uso del modelo *HydroBID Flood* (Hydronia, 2020) para llevar a cabo el análisis de inundaciones urbanas y la formulación de soluciones de esta problemática a través de la evaluación de propuestas de medidas tanto estructurales como no estructurales.

El programa de transferencia tecnológica permitió la adquisición de los conocimientos necesarios para desarrollar estudios relacionados con los problemas generados por las inundaciones urbanas, la evaluación de la eficacia de la infraestructura de mitigación de inundaciones urbanas, así como el prediseño de estas.

Previo a la realización de la fase de transferencia e implementación, se realizó la integración dinámica del modelo *HydroBID Flood* con el modelo de código abierto para simulaciones de sistemas de drenaje de la Agencia de Protección Ambiental, *EPA SWMM* (EPA-SWMM, 2020).

Este modelo integrado permitió realizar simultáneamente el cálculo de los caudales de tránsito tanto en las calles como en los conductos de drenaje que integran la red secundaria, para desarrollar una evaluación detallada del comportamiento de los sistemas de drenaje ante escenarios de eventos de lluvia.

A los fines de evaluar las bondades que tiene el modelo *HydroBID Flood* integrado con *EPA-SWMM*, el cual se identifica como *HydroBID Flood*, los profesionales de la Municipalidad de Santa Fe seleccionaron como caso estudio a dos cuencas urbanas que se encuentran ubicadas en la

Vertiente Oeste de esta ciudad, identificadas como Estado de Israel y Flores. Esta aplicación permitió evaluar las capacidades del modelo para simular la dinámica de las inundaciones en estas cuencas y, adicionalmente, se pudo realizar el prediseño y evaluación de la efectividad de obras de mitigación.



2. HYDROBID FLOOD



HydroBID Flood, que tiene como base el motor de cálculo del modelo RiverFlow2D, es un modelo combinado de simulación hidráulica e hidrológica, evolución del fondo y transporte de contaminantes para ríos, estuarios y llanuras de inundación, basado en el método de volúmenes finitos. Es capaz de transportar avenidas en ríos y simular inundaciones sobre llanuras y terrenos complejos con una alta resolución, velocidad remarcable y gran estabilidad y precisión. El uso de mallas de celdas triangulares adaptativas al terreno permite resolver el flujo alrededor de puntos clave en cualquier entorno fluvial (Figura 1).

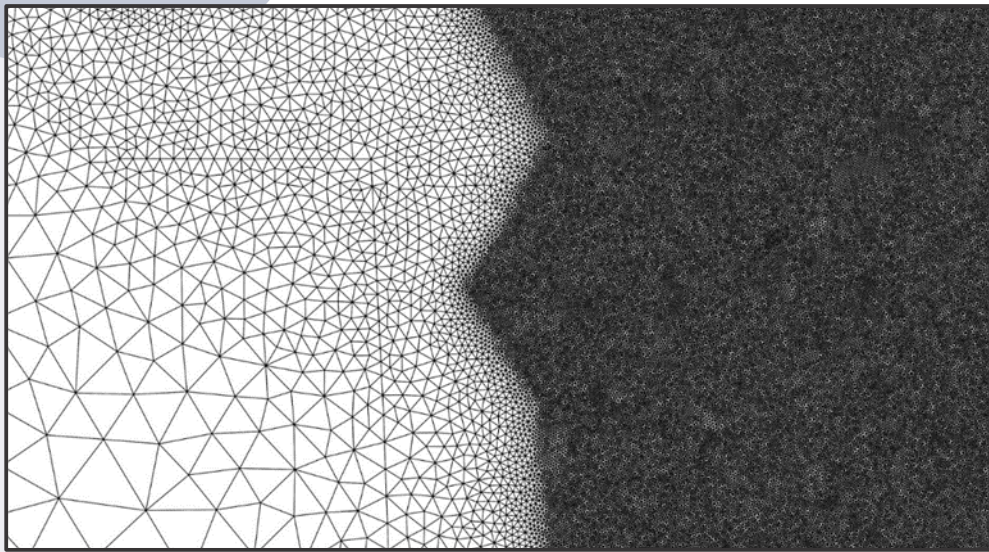


Figura 1. Mallas triangulares flexibles.

La interfaz de usuario de HydroBID Flood está basada en el Sistema de Información Geográfica QGIS (www.qgis.org). Se ha desarrollado un complemento (plugin) para QGIS que provee interfaz gráfica de usuario de tipo GIS que proporciona funcionalidades interactivas para generar y refinar la malla usada por HydroBID Flood (Figura 2). HydroBID Flood usa objetos familiares de GIS, como puntos, arcos (polilíneas) y polígonos para construir una representación de alto nivel del modelo, facilitando la asignación de condiciones de contorno y del parámetro que define la rugosidad del fondo de cada celda, permitiendo al usuario gestionar de forma efectiva el proceso de modelado.



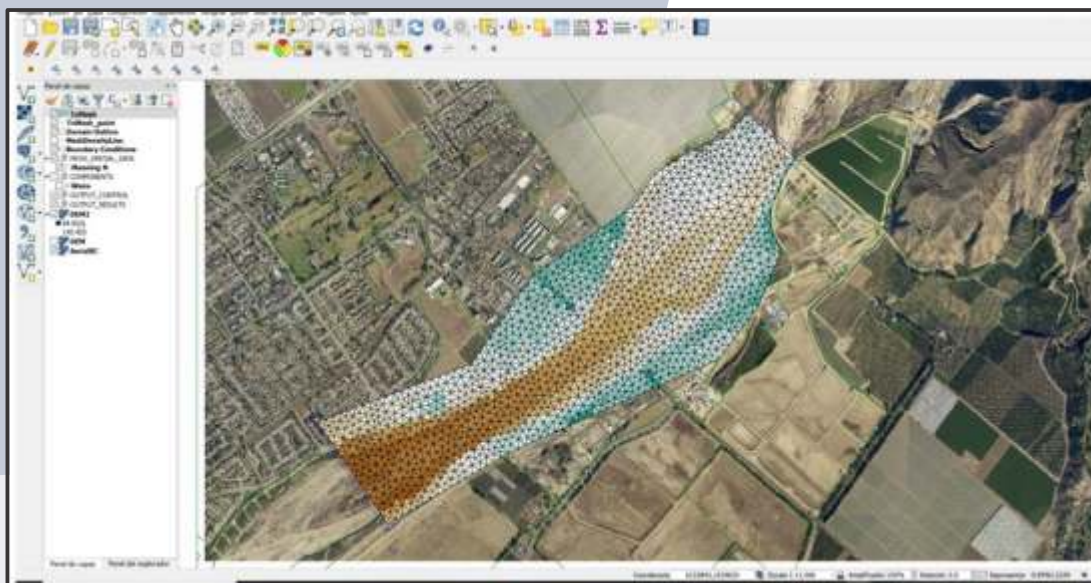


Figura 2. Interfaz de usuario en QGIS.

HydroBID Flood ofrece un amplio conjunto de herramientas de visualización, incluyendo visualización 3D, animaciones y exportación de gráficos a Google Earth (Figura 3). El motor de cálculo de RiverFlow2D usa un esquema en volúmenes finitos preciso y estable que elimina las dificultades que el contorno y los inicios “encaliente” de la simulación que presentan algunos modelos bidimensionales en mallas flexibles.



Figura 3. Representación de mapa de profundidades.

HydroBID Flood utiliza las ecuaciones de aguas poco profundas resultantes de la integración en la vertical de las ecuaciones de Navier-Stokes. Por lo tanto, el modelo no calcula aceleraciones ni velocidades verticales y consecuentemente no puede resolver flujos secundarios. El esfuerzo de fondo se supone que sigue las direcciones de la velocidad promediada en la vertical. El modelo hidráulico no incluye términos de dispersión ni turbulencia. La disipación turbulenta y las pérdidas de energía se tienen en cuenta mediante el término n de Manning en las ecuaciones de cantidad de Movimiento.

El modelo puede integrar estructuras hidráulicas como alcantarillas, presas, puentes, compuertas y tablas de gasto internas. Las capacidades hidrológicas incluyen lluvia, infiltración y evaporación espacialmente distribuidas. Esta versión también cuenta con la funcionalidad del cálculo del esfuerzo del viento sobre la superficie del agua. El modelo cuenta con módulos de transporte de sedimentos, erosión de pilas de puente, transporte de contaminantes y calidad del agua.

EL HydroBID Flood se ha acoplado dinámicamente al modelo EPA-SWMM para análisis hidráulico de redes de alcantarillado y drenaje urbano, se utilizará para calcular el flujo de agua en los colectores de drenaje. El desarrollo se centrará en el intercambio de agua en las dos direcciones entre los dos sistemas: superficial y subsuperficial.



3. PROGRAMA DE TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA SOBRE EL USO DEL MODELO HYDROBID FLOOD



En el año 2016 la División de Agua y Saneamiento del BID creó el Centro de Soporte HydroBID (CeSH) para apoyar técnicamente la gestión y planificación de los recursos hídricos y el avance en el diseño de infraestructura y programas de inversión, con el objetivo de impulsar el desarrollo sostenible, la resiliencia y la seguridad hídrica de América Latina y Caribe. A través de su suite de herramientas HydroBID, de sus aliados técnicos, y de su comunidad de prácticas, el CeSH busca promover el uso de herramientas tecnológicas y el fortalecimiento de las capacidades de las agencias de la región. Uno de los procesos más exitosos ha sido la creación del programa de implementación guiada, un programa de transferencia tecnológica mediante el cual se transfieren conocimientos a través de talleres de capacitación, “manos a la obra” y acompañamiento completo para el desarrollo de un proyecto específico que es implementado completamente por los equipos técnicos de las agencias receptoras.

En el marco del presente estudio se realizaron talleres de capacitación y acompañamiento enfocado en proyectos de drenaje urbano, durante la ejecución, además de explicar la base teórica de las metodologías de análisis utilizadas por el modelo, se llevaron a cabo una serie de prácticas que permitieron mostrar las capacidades de los componentes que lo integran. Es importante destacar que durante estos talleres se incluyó la nueva versión (actualizada) del componente de Drenaje Urbano, que como fue referido en párrafos anteriores, realiza la integración del HydroBID Flood con el modelo SWMM desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA).

A continuación, se describen las principales características de los talleres:

- Los talleres fueron ejecutados a través de sesiones remotas en las que se impartió el contenido específico de cada uno de los temas considerados en la agenda de trabajo. Cada sesión consistió en un video de aproximadamente una hora, seguido de una sesión de preguntas y respuestas, en vivo.
- Algunas de las sesiones fueron tutoriales prácticos, completados por los participantes antes del comienzo de la sesión siguiente. En este proceso los instructores de Hydronia respondieron las preguntas planteadas por los participantes, haciendo uso de correos electrónicos y durante las sesiones de preguntas y respuestas que formaron parte de las presentaciones tanto teóricas como prácticas.
- La realización de talleres en la modalidad virtual permite a los asistentes poder revisar cada taller en cualquier momento.

Los talleres se dividieron en dos módulos, cada uno de los cuales comprende sesiones teóricas y prácticas para la resolución de diferentes ejercicios usando el software HydroBID Flood, que fue desarrollado utilizando la plataforma del sistema de información geográfica QGIS.

- En el Módulo I se realizó una introducción a los sistemas de información geográfica (SIG) y modelos digitales de terreno (MDT) para modelación hidrológica e hidráulica con HydroBID Flood. Adicionalmente se describieron los conceptos básicos de hidrología necesarios para la aplicación del componente hidrológico del modelo, así como las características del proceso de generación y refinamiento de mallas utilizando

el HydroBID Flood.

- En el Módulo II se describieron las aplicaciones del modelo, para realizar el diagnóstico y análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones urbanas, considerando o no la existencia de estructuras hidráulicas como puentes, alcantarillas, diques, compuertas y redes tanto primarias como secundarias de drenaje urbano, que incluyen las cámaras de inspección o bocas de visita y la red de colectores.

Los detalles del proceso de transferencia tecnológica pueden observarse en el Anexo1.



4. APLICACIÓN DEL MODELO HYDROBID FLOOD A CASOS ESTUDIO, SELECCIONADOS POR EL PERSONAL PROFESIONAL DE LA MUNICIPALIDAD DE LA CIUDAD DE SANTA FE ARGENTINA



4.1 INTRODUCCIÓN

4.1.1 Descripción general del área del estudio

La ciudad de Santa Fe es la capital de la provincia homónima, en Argentina, localizada en el centro-este del país, entre los valles de inundación de dos ríos de llanura, el río Paraná al Este y el río Salado al Oeste. En la Figura 4 se muestra la ubicación relativa de la provincia y de la ciudad de Santa Fe.

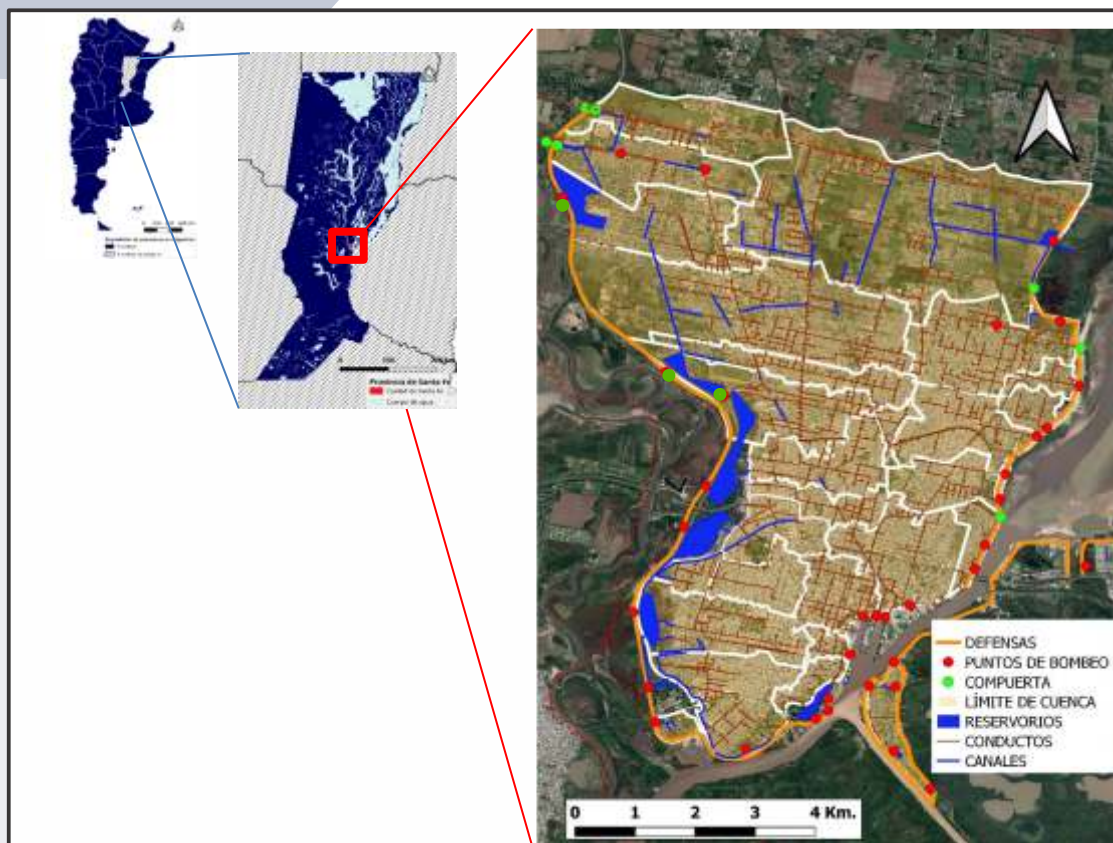


Figura 4. Ubicación de la provincia y de la ciudad de Santa Fe Argentina. Fuente: Cello P. (2021)

La ciudad tiene una superficie total del orden de las 6800 ha, con una población de 400000 habitantes, y con una infraestructura hidráulica para mitigación del riesgo de inundaciones consistente en unos 230 km de conductos de drenaje y 37 km de terraplenes de defensas o diques marginales para la protección contra inundaciones fluviales (Cello, 2021). Adicionalmente, como parte de esta infraestructura existen unos 39 puntos de operación del sistema de drenaje urbano que incluyen reservorios, estaciones de bombeo y compuertas de regulación (Ver Figura 5).

Como fue descrito anteriormente, los casos estudio seleccionados por los profesionales de la Municipalidad de Santa Fe, se localizan en dos cuencas urbanas que se encuentran ubicadas en

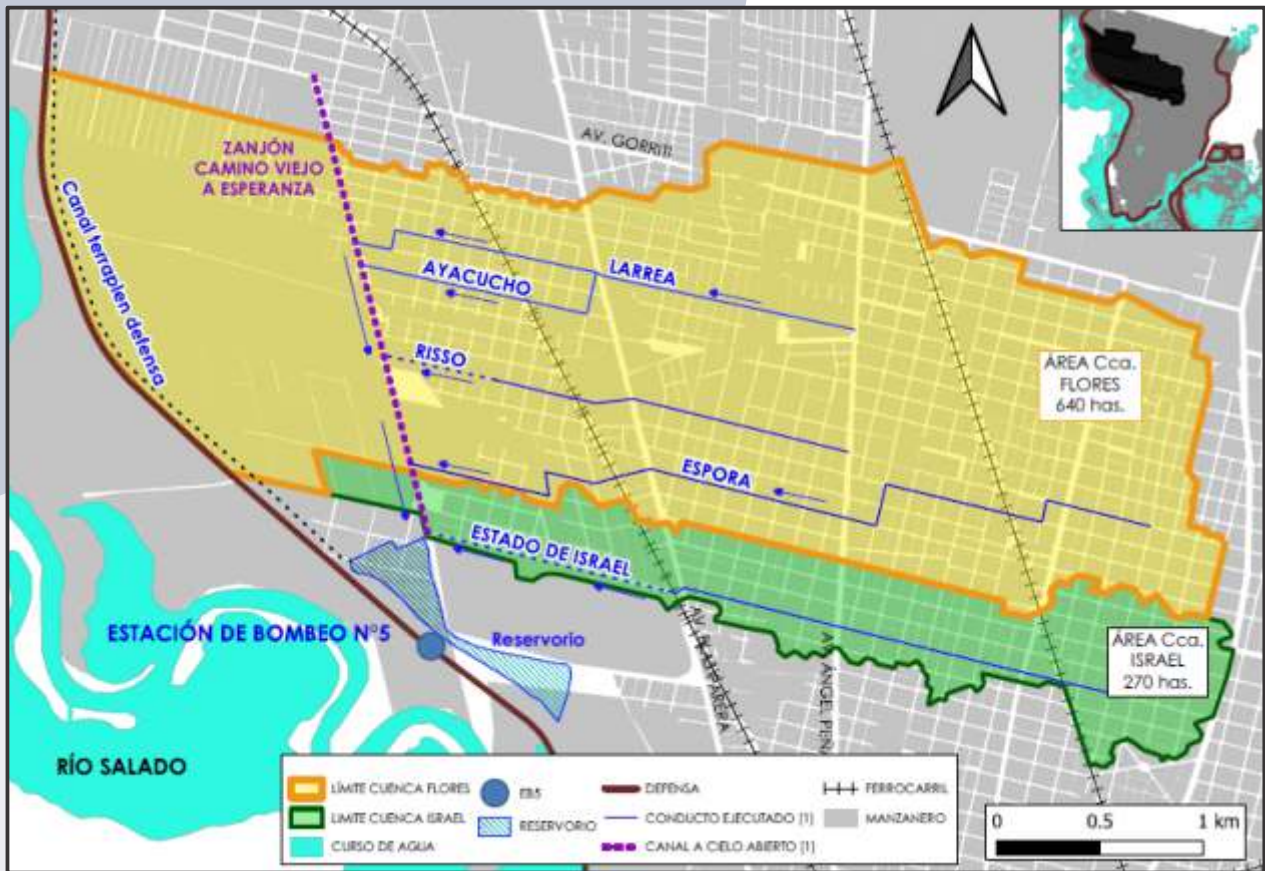


Figura 6. Detalle de la delineación de la cuenca Estado de Israel y de la cuenca Flores.
Fuente: Cello P. (2021).

Los excedentes de aguas de lluvia que se generan en las cuencas del Estado de Israel y Flores ingresan al reservorio que se muestra en la Figura 7, donde también se observan las alcantarillas que permiten la descarga por gravedad de estos excedentes en el Río Salado, así como las estaciones de bombeo que se activan cuando el nivel en el río no permite la descarga de estos excedentes por gravedad.





Figura 7. Ubicación del reservorio donde ingresan los excedentes de aguas de lluvia que se generan en las cuencas del Estado de Israel y Flores. Ubicación de la estación de bombeo y alcantarilla que permiten la descarga en el Río Salado.

Fuente: Cello P. (2021).

4.1.2 Descripción del problema de inundaciones urbanas en la ciudad de Santa Fe

En la Figura 8 se muestra una sección transversal, desde la margen Oeste hasta la margen Este de la ciudad de Santa Fe, donde se pueden observar los reservorios que almacenan los excesos de aguas de lluvia que se generan en ambas vertientes (Oeste y Este, ver Figura 4), y las secciones transversales de los ríos Salado y Paraná. Adicionalmente, en esta figura se presenta la cota promedio de la ciudad y su pendiente media, así como las cotas de agua que eventualmente se alcanzan en los ríos Salado y Paraná.

A manera de ejemplo, en la Figura 9 se incluyen un grupo de fotos que muestran el efecto de las inundaciones fluviales que se produjeron en el año 2003 debido al desborde del río Salado sobre la margen Oeste de la ciudad de Santa Fe. En la actualidad existe un sistema de terraplenes o diques marginales, que protegen la ciudad de los posibles desbordes de los ríos Salado y Paraná, debido a la ocurrencia de eventos de crecidas extremas.

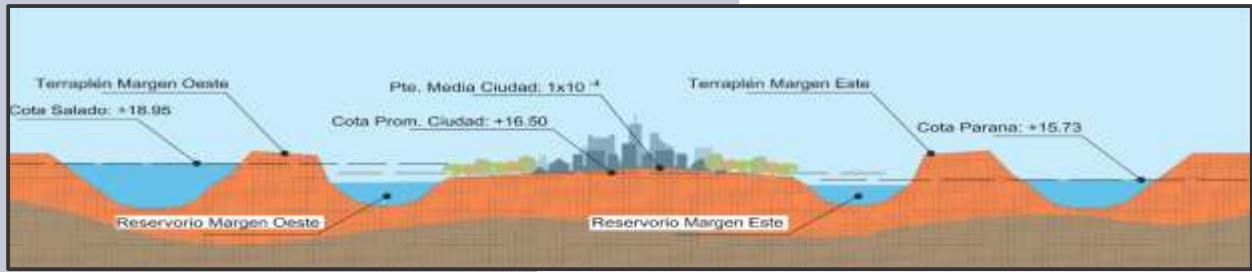


Figura 8. Sección transversal desde la margen Oeste hasta la margen Este de la ciudad de Santa Fe.
Fuente: Cello P. (2021).



**Hoy el sistema terraplenes protege
 contra las crecidas del Salado y del
 Paraná**

Figura 9. Fotografías que muestran el efecto de las inundaciones fluviales que se produjeron en el año 2003 debido al desborde del río Salado sobre la margen Oeste de la ciudad de Santa Fe.
Fuente: Cello P. (2021).

En referencia a las inundaciones pluviales que se producen en la ciudad de Santa Fe, en las Figuras 10 y 11, se presentan un grupo de fotos que reflejan el efecto de este tipo de inundaciones debido a la ocurrencia de tormentas extremas durante los días 26 de marzo al 4 de abril de 2007, y del 14 al 15 de diciembre de 2019, respectivamente.



Figura 10. Fotografías que muestran el efecto de las inundaciones pluviales que se produjeron en el año 2007 debido a la ocurrencia de una tormenta extrema durante el período 26 de marzo al 4 de abril, sobre la ciudad de Santa Fe.
Fuente: Cello P. (2021).



Figura 11. Fotografías que muestran el efecto de las inundaciones pluviales que se produjeron en el año 2019 debido a la ocurrencia de una tormenta extrema durante los días 14 y 15 de diciembre, sobre la ciudad de Santa Fe.
Fuente: Cello P. (2021).

En el mapa contenido en la Figura 12 se identifican los sitios donde se realizaron reclamos, por parte de los habitantes de la zona, debido al efecto de las inundaciones pluviales que se produjeron en el año 2019 debido a la ocurrencia de la tormenta extrema durante los días 14 y 15 de diciembre, sobre la ciudad de Santa Fe. Adicionalmente, en esta figura se incluyen las localizaciones consideradas como críticas desde el punto de vista de inundación pluvial. Varios de estos reclamos y puntos críticos se ubican en las cuencas Estado de Israel y Flores.



Figura 12. Sitios donde se realizaron reclamos por parte de los habitantes de la zona debido al efecto de las inundaciones pluviales que se produjeron en el año 2019 debido a la ocurrencia de una tormenta extrema durante los días 14 y 15 de Diciembre, sobre la ciudad de Santa Fe.

Fuente: Cello P. (2021).

4.2 MONITOREO DE LA INFORMACIÓN METEOROLÓGICAS E HIDROMÉTRICA QUE SE GENERA EN LA ZONA DEL ESTUDIO

La municipalidad de la ciudad de Santa Fe dispone de trece estaciones meteorológicas automáticas, cuatro urbanas y nueve suburbanas que registran información de precipitación, temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento.

En el caso de la precipitación el monitoreo se realiza cada cinco minutos, mientras que la transmisión de la información se lleva a cabo cada quince minutos, la cual se almacena en la base de datos del servidor de la Municipalidad y puede ser consultada en la página WEB de esta institución. El procesamiento de esta información permite obtener los valores de intensidad de la lluvia, así como los valores acumulados respecto al tiempo.

En el sitio Barranquitas del río Salado se ubica una estación hidrométrica, mientras que en el sistema del río Paraná se ubica otra estación hidrométrica sobre el río Colastiné. En ambas estaciones existen limnógrafos que permiten estimar la cota de agua de estos ríos, las cuales se transmiten al servidor de la Municipalidad, cada seis horas.

En la Figura 13 se muestran las ubicaciones de las estaciones identificadas como urbanas, mientras que en la Figura 14 se muestran las suburbanas.

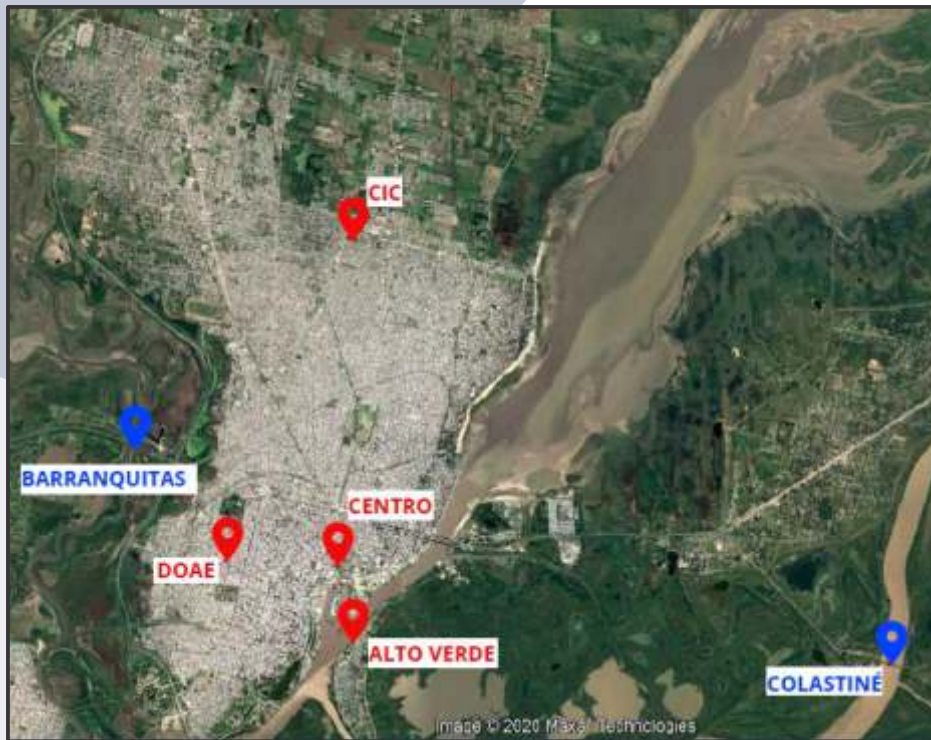


Figura 13. Ubicación de las estaciones meteorológicas e hidrométricas identificadas como urbanas.
Fuente: Cello P. (2021).



Figura 14. Ubicación de las estaciones meteorológicas e hidrométricas identificadas como suburbanas.
Fuente: Cello P. (2021).

4.3 IMPLEMENTACIÓN Y APLICACIÓN DEL MODELO HYDROBID FLOOD, EN LAS CUENCAS ESTADO DE ISRAEL Y DEL BARRIO TRANSPORTE UBICADO EN LA CABECERA DE LA CUENCA FLORES

4.3.1 Características de la modelación hidrodinámica del escurrimiento superficial en el dominio de cálculo de las cuencas urbanas bajo estudio, utilizando el módulo de drenaje urbano del modelo HydroBID Flood

El Módulo de Drenaje Urbano realiza la integración dinámica del modelo original *HydroBID Flood* con el modelo de código abierto para simulaciones de sistemas de drenaje de la Agencia de Protección Ambiental, *EPA SWMM*.

La aplicación de este modelo integrado permite realizar simultáneamente el cálculo de los caudales de tránsito, que se generan en el dominio de cálculo de la cuenca bajo estudio, tanto en las calles como en los conductos de drenaje que integran la red secundaria, para desarrollar una evaluación detallada del comportamiento de los sistemas de drenaje ante escenarios de eventos de lluvia.

Con el modelo *HydroBID Flood* original se estima la generación y tránsito bidimensional del escurrimiento superficial en la cuenca bajo estudio, mientras que utilizando el modelo *SWMM* se realiza el tránsito unidimensional de los caudales que entran a través de los sumideros o bocas de tormentas a la red colectores que conforman el drenaje secundario de la zona urbana. El modelo *SWMM* tiene la capacidad de modelar redes de colectores abiertas o cerradas, de tamaño ilimitado y con conductos con diferentes características geométricas.

4.3.2 Definición de los casos estudios analizados utilizando el Modelo HydroBID Flood

Para la aplicación del modelo *HydroBID Flood* se consideraron cuatro (4) casos estudio, los cuales se describen a continuación:

- Caso 1. Cuenca Estado de Israel hasta la descarga de los excesos de las aguas de lluvia en el Río Salado. Este análisis permitió evaluar la capacidad que tiene el modelo para simular la dinámica de las inundaciones, validando los resultados utilizando la información disponible sobre los reclamos por anegamientos realizados por la comunidad ante la municipalidad. En este caso se utilizó la red de drenajes existente considerándolo como un reflejo o referencia de la situación actual.
- Caso 2. Cuenca Estado de Israel considerando una obra de mitigación a través del diseño del colector J.P. López y conductos secundarios en un área específica de la cuenca donde se tienen problemas importantes de anegamientos. Los resultados de la aplicación del modelo se comparan con los obtenidos en el Caso 1 (Referencia), a los fines de evaluar la efectividad que tienen estas obras.

- Caso 3. Zona alta (cabecera) de la cuenca Flores, donde se ubica el Barrio Transporte. Al igual que en el Caso 1, en este escenario se realiza un análisis de la dinámica de las inundaciones en el Barrio Transporte considerando la red de drenajes existente, validando los resultados utilizando la información de reclamos.
- Caso 4. Corresponde a la aplicación del modelo en el Barrio Transporte, es decir, la misma superficie considerada en el Caso 3, pero incorporando del diseño los colectores J. de La Rosa-Genesis y colectores en 1° de Mayo. Los resultados de la aplicación del modelo se comparan con los obtenidos en el Caso 3 (Referencia), a los fines de evaluar la efectividad que tienen estas obras.

4.3.3.1 Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Análisis y procesamiento

Como modelo digital de elevaciones se obtuvo el producto identificado como AW3D, generado por la empresa RESTEC (*Remote Sensing Technology Center of Japan*) con una resolución de 0.5 m a los fines de representar la topografía del terreno en la zona del estudio. Este producto incluyó el modelo digital de terreno (MDT) y el modelo digital de superficie (MDS), que fueron validados con información de cotas de terreno en puntos específicos, disponible en la Municipalidad de Santa Fe.

Para mejorar la resolución del MDT el equipo de trabajo de la Municipalidad combinó ambas fuentes de información a través del uso del software QGIS (Sistema de Información Geográfica), generando una capa vectorial que incluye las edificaciones de Santa Fe (obtenida de la base de datos de la Municipalidad) que fue utilizada para extraer del MDS las cotas de los techos de cada edificación. Posteriormente, esta capa se combinó con el modelo digital de terreno (MDT) creando lo que se identifica como un modelo digital híbrido (MDH), que incluye las cotas de las superficies de las calzadas y veredas (Corregidas y validadas por RESTEC) y las cotas de los techos de cada manzana. Toda esta información está proyectada al sistema local EPSG 22185.

En la Figura 15 se presenta el Modelo Digital Híbrido (MDH) y los puntos relevados en el terreno.



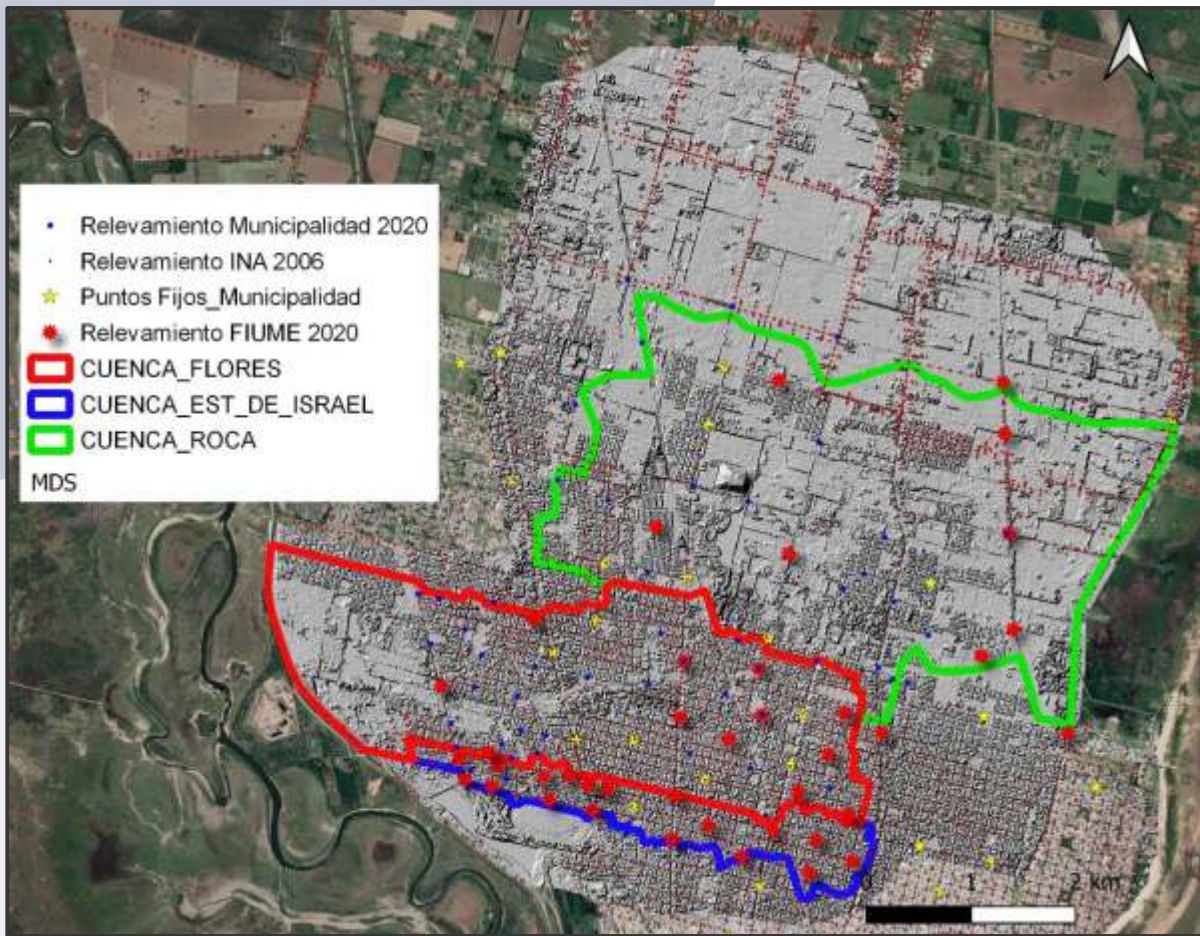


Figura 15. Modelo Digital Híbrido y puntos relevados en el terreno.
Fuente: Cello et al. (2021).

El grupo de trabajo de la Municipalidad llevó a cabo una serie de análisis con el objetivo de verificar la precisión en altitud del MDH, concluyendo que la precisión del MDT es aceptable a los fines de la modelación a nivel de subcuencas y se puede proceder al uso del modelo MDH como la base topográfica para llevar a cabo las simulaciones y análisis de los casos estudio. Los errores medios obtenidos de la comparación del MDH y de los diferentes MDS disponibles para la ciudad de Santa Fe con relevamientos desarrollados en la ciudad puede observarse en la siguiente tabla

	Error medio cuadrático (m)		
	FIUME	INA	Municipalidad
MDH	0.377	0.521	0.421
MDS	0.419	1.325	1.334

4.3.3.2 Relevamientos y caracterización de la geometría de los conductos

A los fines de caracterizar las estructuras hidráulicas existentes que forman parte de la red secundaria de drenaje urbano en el área del estudio, se procedió a recopilar toda la información existente que permitió la integración y actualización de la base de datos de la Municipalidad, para poder estructurar el esquema topológico del modelo hidráulico de drenaje urbano que requiere el modelo EPA-SWMM.

Como punto de partida se utilizó toda la información disponible en la Dirección de Hidráulica de la Secretaría de Asuntos Hídricos y Gestión de Riesgos, que permitió describir en detalle los componentes de la red de drenaje de la ciudad compuesta por estaciones de bombeos, reservorios, canales a cielo abierto, desagües entubados y sus correspondientes elementos tales como bocas de tormenta o sumideros, cámaras de inspección o bocas de visita, acometidas, rejas de protección, entre otros. Adicionalmente, se recopiló toda la información de cotas de fondo de los conductos y cámaras de inspección, secciones transversales, pendientes, etc.

De esta forma, se identificaron 96 puntos localizados en la cabecera de conductos, en cambios de sección, en la descarga de un entubado a un canal, en la unión de ramales, etc., los cuales se muestran en la Figura 16.



Figura 16. Localización de puntos identificados en la red pluvial para su relevamiento.

Fuente: Cello et al. (2021).

Utilizando este conjunto de puntos y con base a la ubicación de los puntos fijos de la Municipalidad de Santa Fe, se llevaron a cabo varias campañas para el reconocimiento de la red y la toma de cotas y datos geométricos.

En esta primera etapa, el relevamiento se focalizó en la cuenca Estado de Israel, en la cabecera de la cuenca Flores hasta Avenida Peñaloza, y en la cabecera de la cuenca Guadalupe Oeste hasta la Av. Aristóbulo del Valle.

4.3.3.3 Tormentas de diseño

Para la definición del hietograma de diseño que representa la variación temporal que caracteriza la tormenta de diseño utilizada como información meteorológica en la aplicación del modelo HydroBID Flood, se utilizaron las curvas de Intensidad Duración Frecuencia descritas en la referencia Marcus et al. (2016), desarrolladas utilizando el método de Sherman (1931). La información pluviográfica utilizada en esta aplicación se obtuvo de los registros de la estación meteorológica del Centro de Informaciones Meteorológicas de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (CIM-FICH), durante el período 1986-2016 (31 años).

Siguiendo las normas de la Municipalidad de Santa Fe, se estableció un período de retorno de 2 años y una duración de 120 minutos, para el diseño del macro y micro drenajes en áreas residenciales unifamiliares y zona de expansión.

En la Figura 17 se presenta el hietograma de la tormenta de diseño para intervalos de tiempo de cinco (5) minutos, donde se observa una intensidad máxima de lluvia de 122 mm/h.

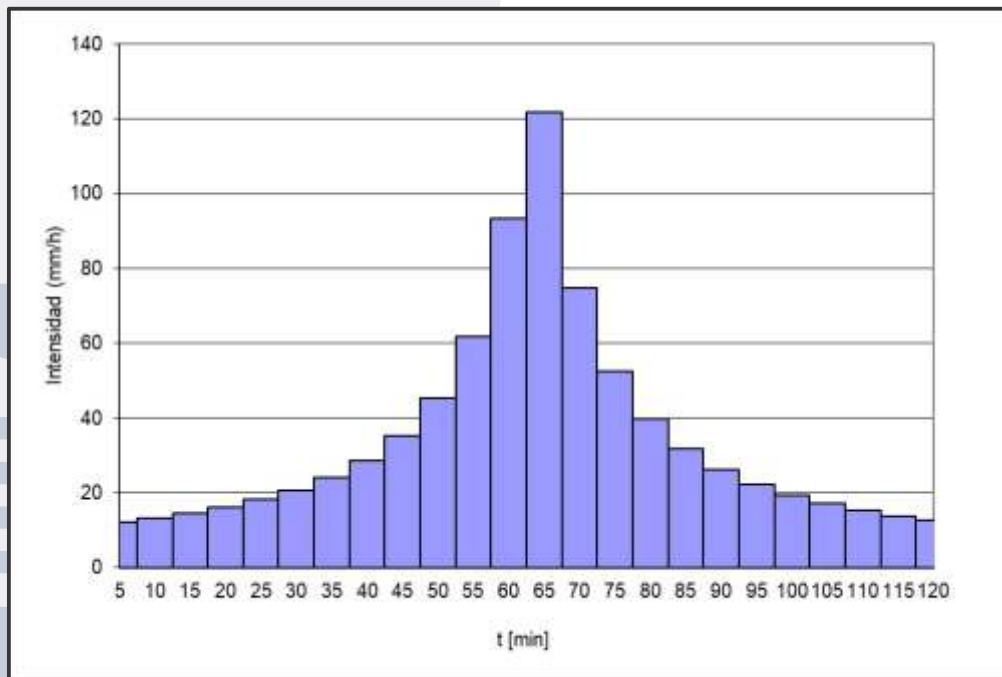


Figura 17. Hietograma de diseño para una recurrencia de 2 años y una duración de 120 minutos.

Fuente: Cello et al. (2021).

4.3.4. Características de la cuenca Estado de Israel y de la infraestructura que conforma el sistema de drenaje urbano existente. Caso 1 - Escenario de Referencia

En la Figura 18 se presenta el detalle de la delineación de la cuenca Estado de Israel, usando el modelo digital de elevaciones (MDH). Esta cuenca tiene una superficie de 192 ha, caracterizada por una topografía plana con depresiones y pendientes entre 1.3×10^{-4} - 1.6×10^{-4} , y cotas del terreno que varían entre 15.6 m -17.5 m (Cello P., 2021).

La cuenca presenta una red de drenaje conformada por alrededor de 9852 m de colectores. La mayor parte de los excesos de aguas pluviales que transitan por estos colectores son descargados al río Salado a través de una estructura de alcantarillas, si el agua puede salir por gravedad, o por la Estación de Bombeo N° 5 si la cota de agua del río Salado no permite la descarga en forma gravitacional. El resto de los excedentes de aguas pluviales son trasvasados a la Subcuenca Derqui-Gorostiaga través de los conductos B. Parera y Peñaloza. La cuenca es atravesada por dos líneas de ferrocarril.

Es importante aclarar que en esta fase del estudio no se han incorporado al modelo las bocas de tormenta y su conexión a las cámaras de inspección por lo que se asume que el agua ingresa directamente a través de dichas cámaras a través de la definición del área de colección en HydroBID Flood.

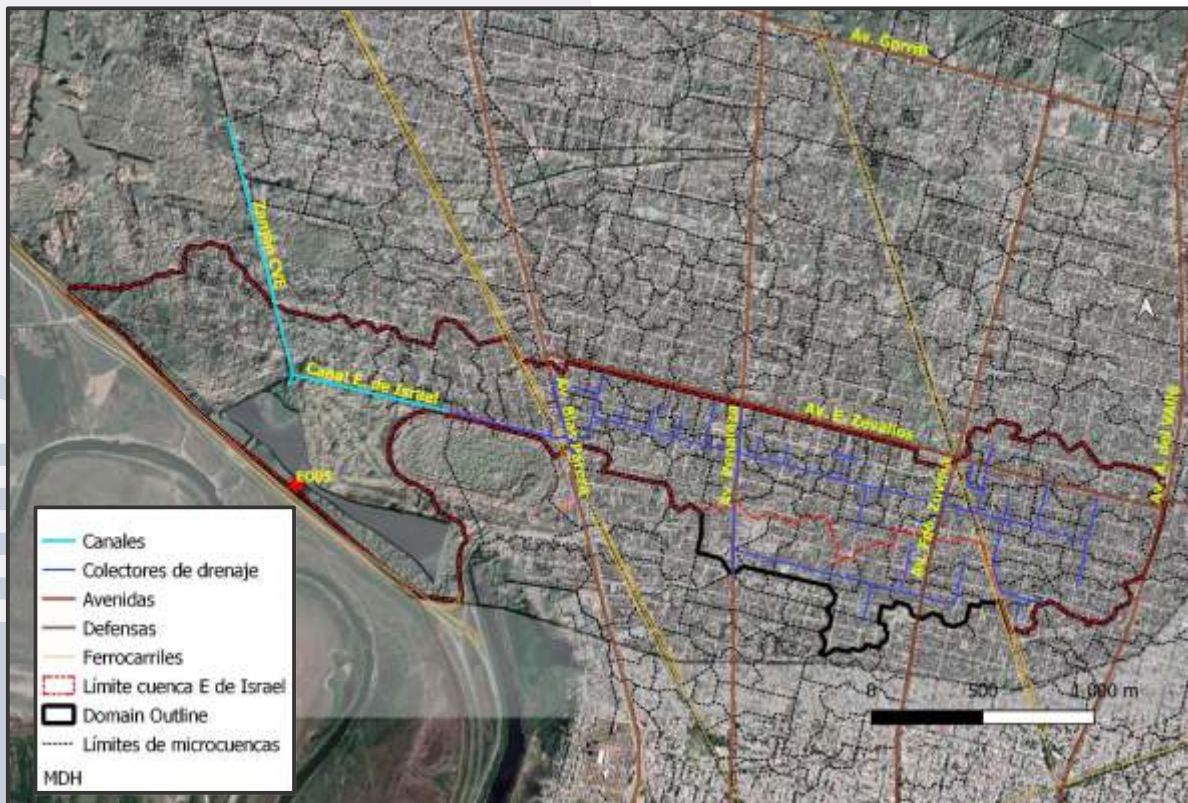


Figura 18. Dominio de cálculo y condiciones de borde superficiales. Cuenca Estado de Israel.

Fuente: Cello et al. (2021).

En esta aplicación se consideraron dos condiciones de borde, una condición definida por un hidrograma de entrada a través del Zanjón CVE (ver círculo de líneas a trazos en rojo en la Figura 18) que proviene de los excedentes de aguas de lluvia que drena la totalidad de la cuenca Flores; y una condición de borde de salida a través de la estructura hidráulica que se ubica a nivel de la estación de bombeo N° 5 (ver círculo de líneas a trazos de color azul en la Figura 18). Adicionalmente, en la Figura 8 se muestra el sitio de descarga del principal colector de drenajes en el Canal Estado de Israel (ver círculo de líneas a trazos en amarillo en la Figura 18), que a su vez descarga sus aguas en el Zanjón CVE.

La Figura 19 muestra la malla de cálculo utilizada en la aplicación del modelo hidrodinámico, la cual contiene 580527 elementos con un rango de tamaños entre 0.5 m y 10 m. En esa figura se puede observar claramente la alta resolución de la malla a lo largo del canal y del zanjón, como así también, a lo largo de las calles y avenidas.

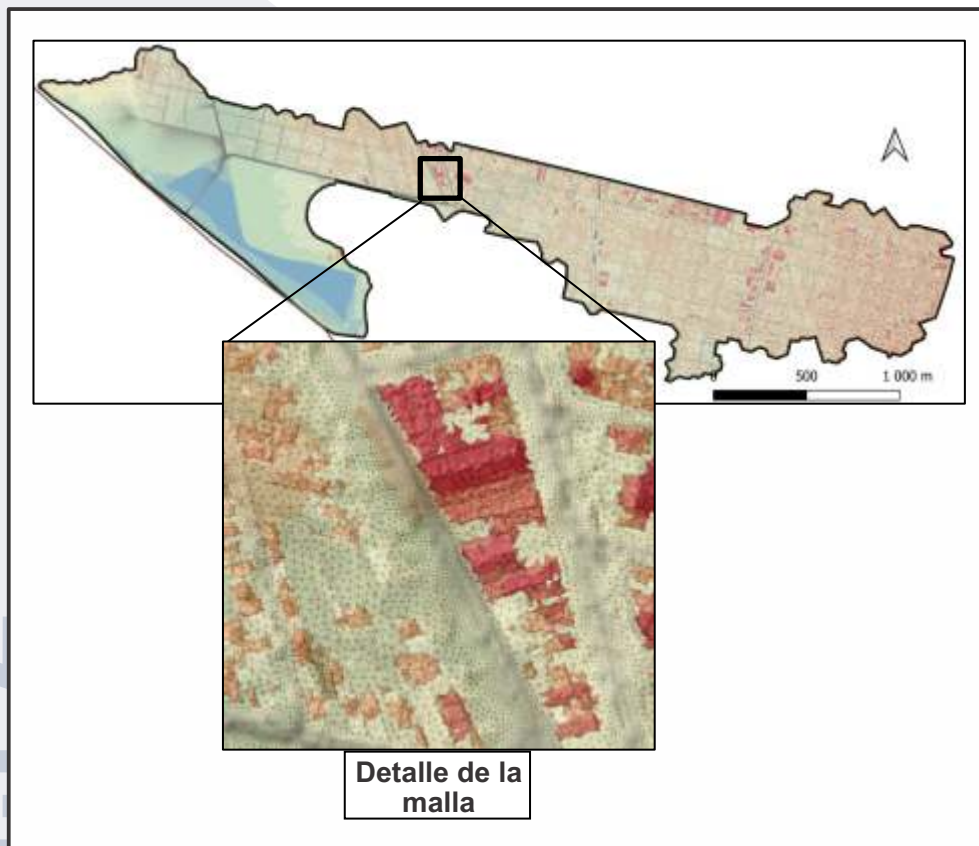


Figura 19. Malla de cálculo utilizada en la cuenca Estado de Israel.

Fuente: Cello et al. (2021).

El resto de la información requerida para implementar el modelo hidrodinámico HydroBID Flood, se muestra en las siguientes figuras:

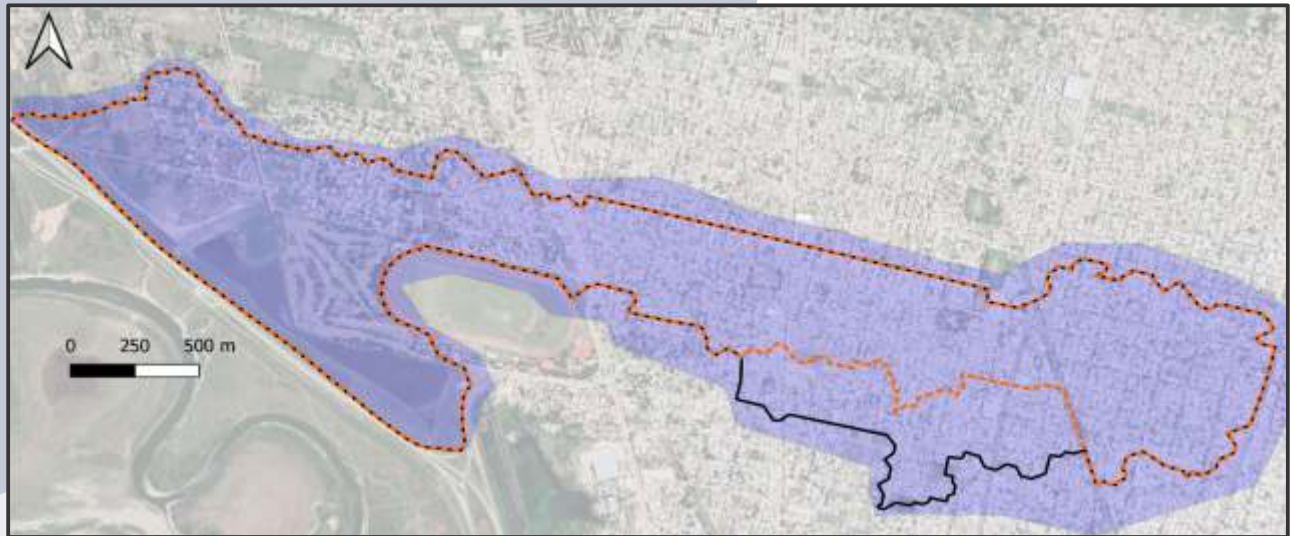


Figura 22. Definición del polígono asociado al hietograma de la tormenta de diseño.
Fuente: Cello et al. (2021).

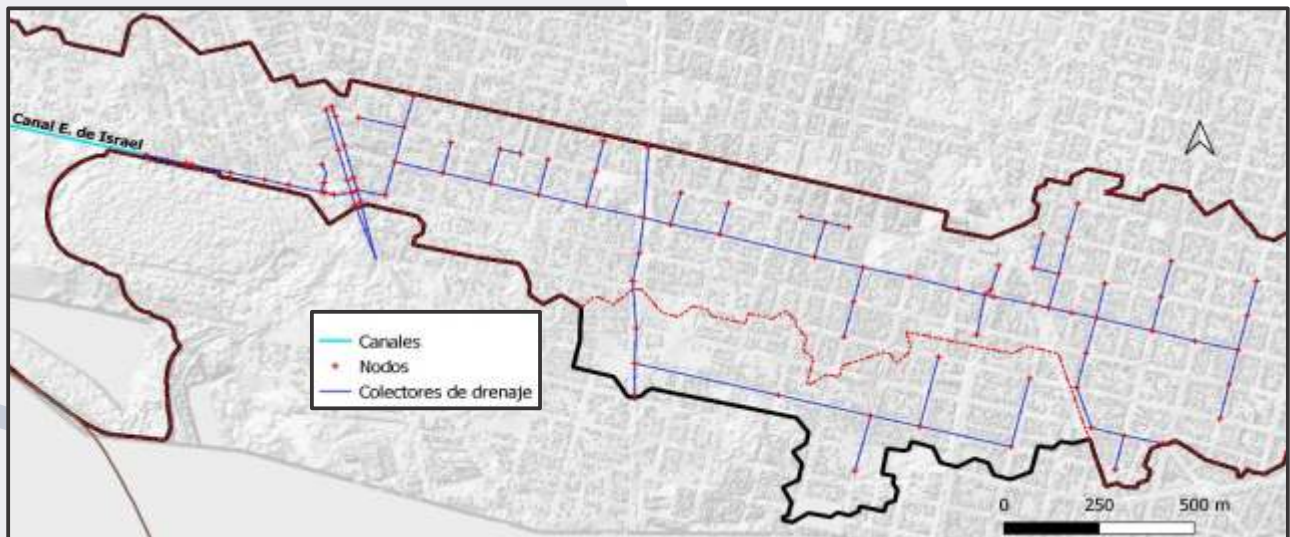


Figura 23. Representación del sistema de colectores de drenaje en EPA-SWMM.
Fuente: Cello et al. (2021).

4.3.5 Características de la intervención en la cuenca Estado de Israel mediante la adopción de una medida estructural. Caso 2 - Escenario medida estructural

Este tipo de medidas permite mejorar la capacidad de evacuación de los excedentes de aguas de lluvia, eliminando o reduciendo los almacenamientos superficiales o anegamientos. En el desarrollo de este caso se implementó como obra adicional a la red de colectores existentes en la cuenca del Estado de Israel, la construcción del colector J.P. López y los conductos secundarios, como se puede apreciar en la Figura 24.

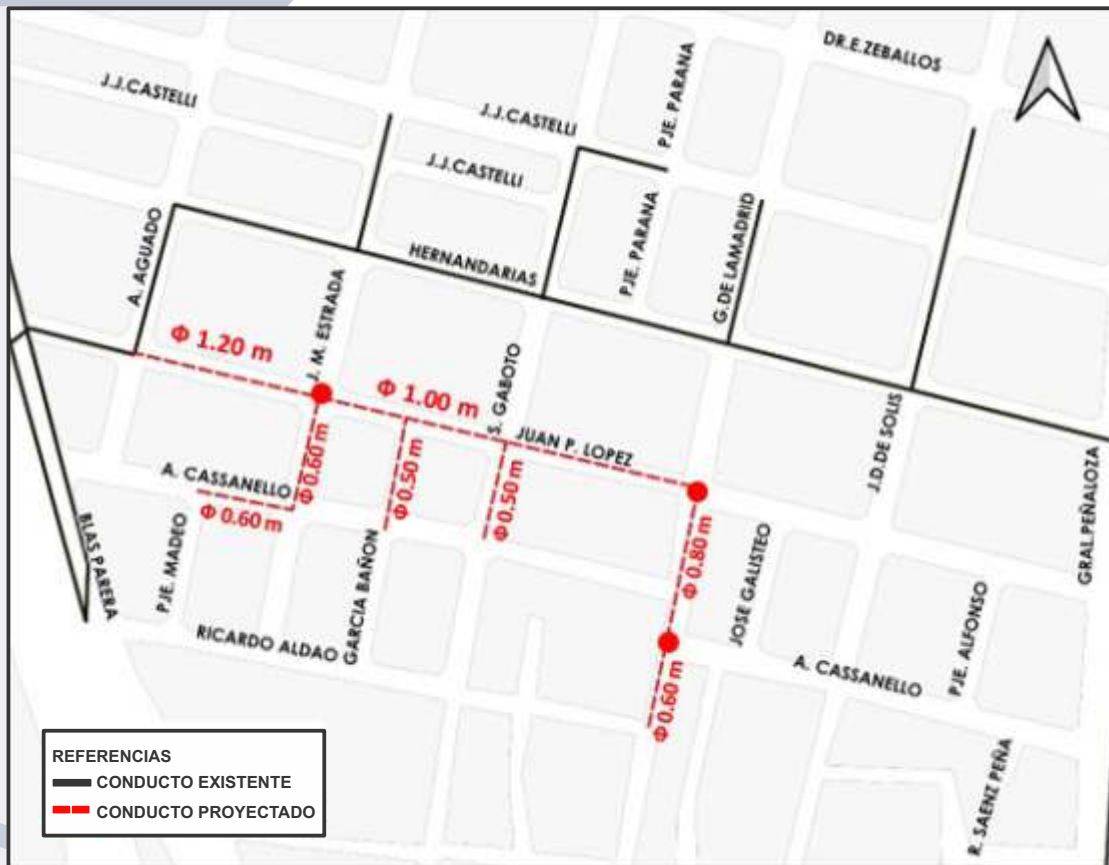


Figura 24. Colector J.P López y conductos secundarios en la cuenca Estado de Israel.
Fuente: Cello et al. (2021).

En este caso, parte del alineamiento de los nuevos conductos (secundarios) caen fuera del dominio de cálculo definido para el Caso 1 (Escenario de Referencia), por tal motivo, fue necesario extender los límites del dominio incorporando a éste los tramos y nodos de tales conductos. El dominio de cálculo se incluye en la Figura 25.

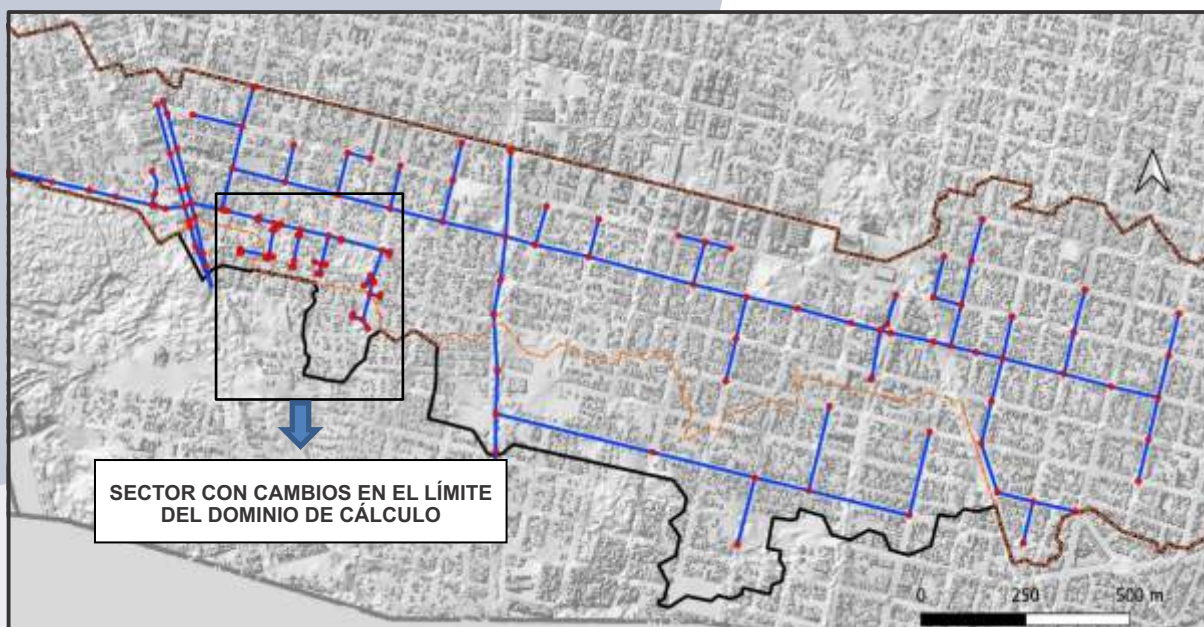


Figura 25. Dominio de cálculo considerado en el Caso 2, en la cuenca Estado de Israel.
Fuente: Cello et al. (2021).

4.3.6 Características de la parte alta de la cuenca Flores, donde se localiza el Barrio Transporte. Caso 3 - Escenario de Referencia

La definición del dominio de cálculo del área que incluye al Barrio Transporte se llevó a cabo considerando la configuración de la topografía y los límites establecidos por INA a escala de microcuencas, identificando las divisorias de aguas bien definidas. Debido a la topografía plana y la interferencia de la infraestructura vial y ferroviaria, fue necesario extender el dominio de cálculo más allá de los límites oficiales que definen el barrio, a los fines de garantizar una adecuada representación de la dinámica del escurrimiento superficial y la descarga por conducto de los excesos de agua de lluvia.

De esta forma, el límite norte se extendió sobre áreas de aporte de la cuenca Roca, el límite este, ubicado al este de la Av. Aristóbulo del Valle dentro del área de aporte de la cuenca Guadalupe Oeste, coincide con una divisoria interna donde el flujo tiende a descargar al colector que se desarrolla sobre dicha avenida, mientras que el límite sur coincide con la divisoria de aguas que comparten las cuencas Flores y Estado de Israel. Por otra parte, y a los fines de reproducir adecuadamente el flujo de los colectores principales hacia el oeste se debió ampliar el área del dominio hasta la Avenida Peñalosa, evitándose toda influencia tanto de las condiciones de borde superficiales como de las condiciones de salidas de los conductos representados sobre el flujo superficial y entubado en el área de estudio (inestabilidades, propagación de ondas y/o efectos de remanso hacia aguas arriba). El dominio de cálculo así definido se muestra en la Figura 26.

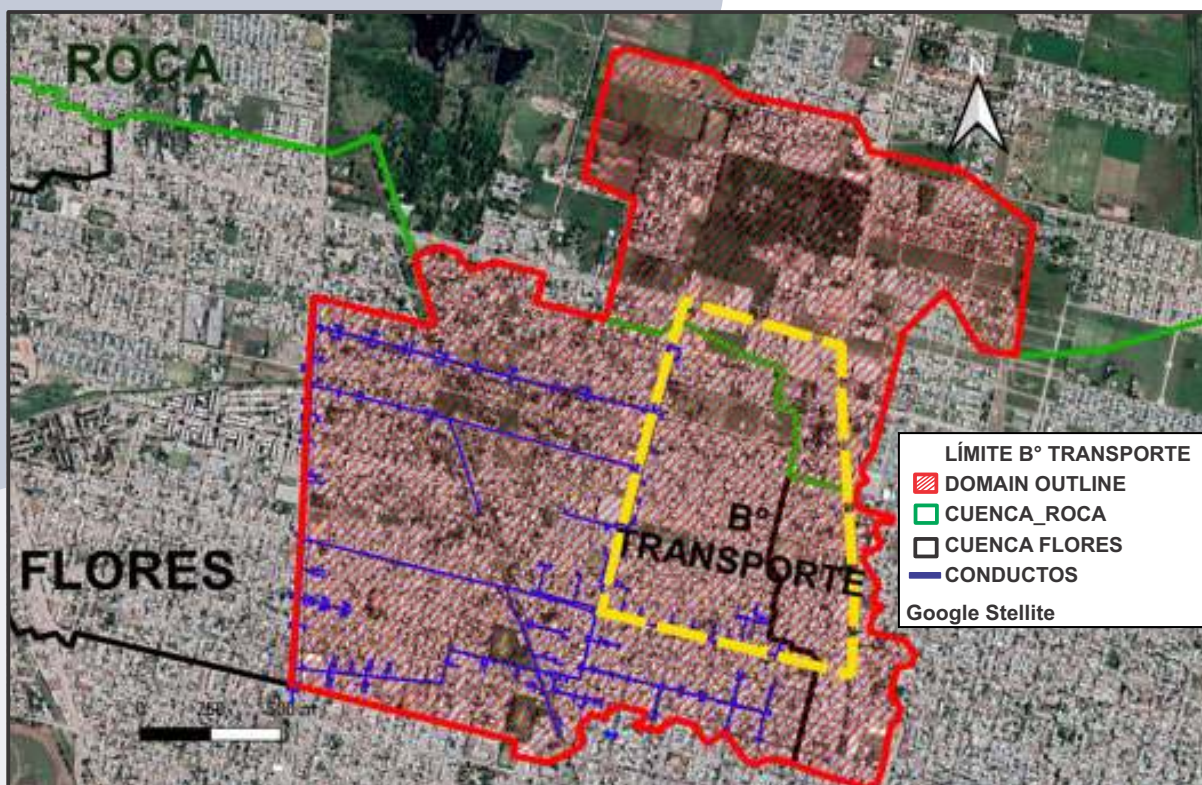


Figura 26. Dominio de cálculo considerado en el Caso 3, en la zona que contiene al Barrio Transporte.
Fuente: Cello et al. (2021).

Una vez definido el dominio de cálculo se procedió a la generación de la malla utilizando el módulo de mallado, el MDH, y las capas de densificación. Se seleccionó un tamaño de celda de discretización a los elementos de cada capa (líneas o polígonos), dependiendo de nivel de detalle con el que se desea capturar la dinámica hídrica en sectores claves como calles, avenidas, terraplenes, otros.

En la Figura 27 se presenta la malla obtenida donde sectores de interés, como calles, avenidas, etc., muestran una mayor densificación para facilitar la captura en detalle del fenómeno que se simula. El número de celdas es igual a 690072, con tamaños entre 1 m y 10 m.

El resto de la información requerida para implementar el modelo hidrodinámico HydroBID Flood, se muestra en las siguientes figuras:

- Figura 28. Definición de los valores del Número de la Curva y los polígonos asociados.
- Figura 29. Definición de los valores del coeficiente de rugosidad de Manning y los polígonos asociados.
- Figura 30. Definición del polígono asociado al hietograma de la tormenta de diseño.
- Figura 31. Representación del sistema de colectores de drenaje en EPA-SWMM.

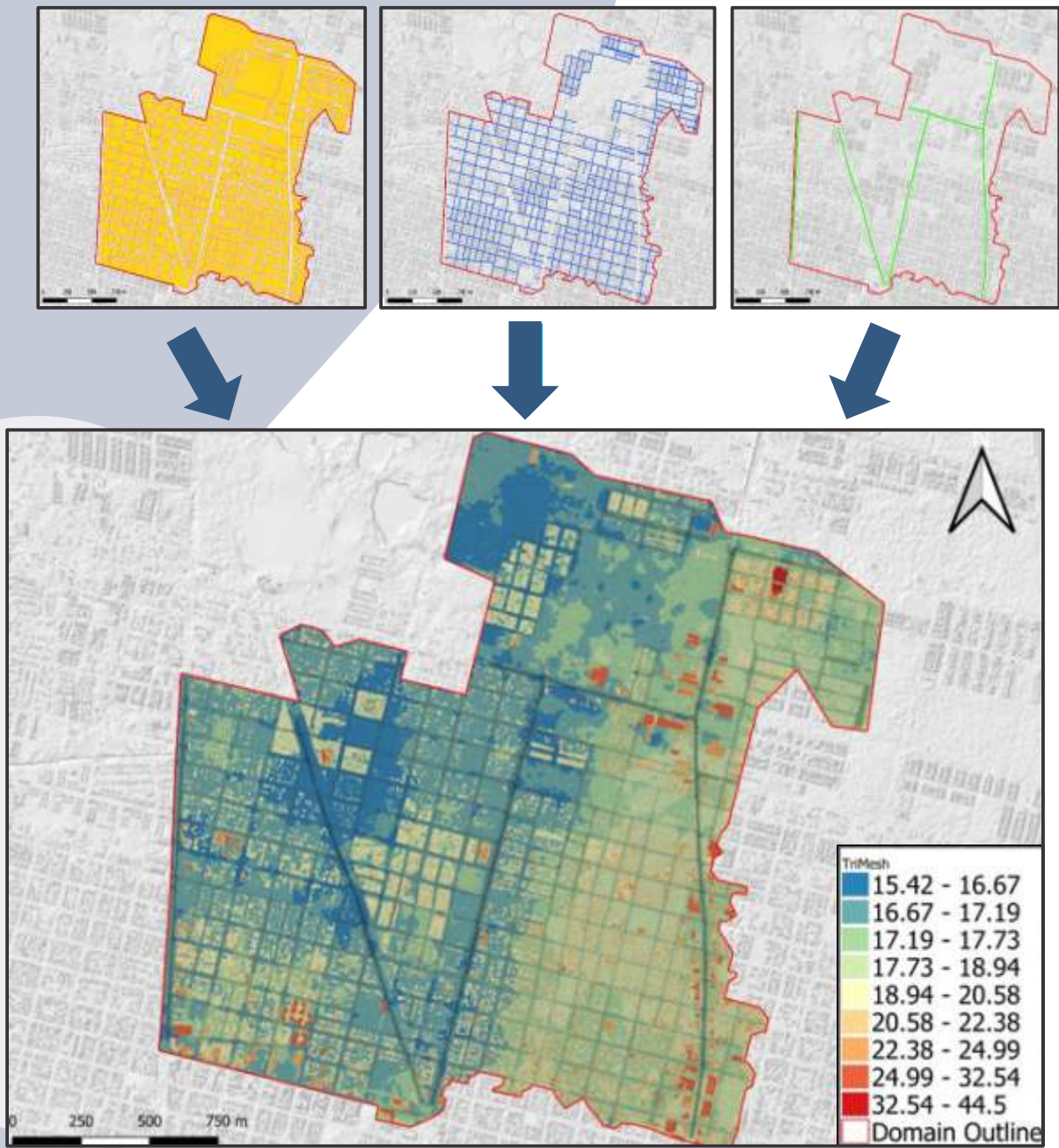
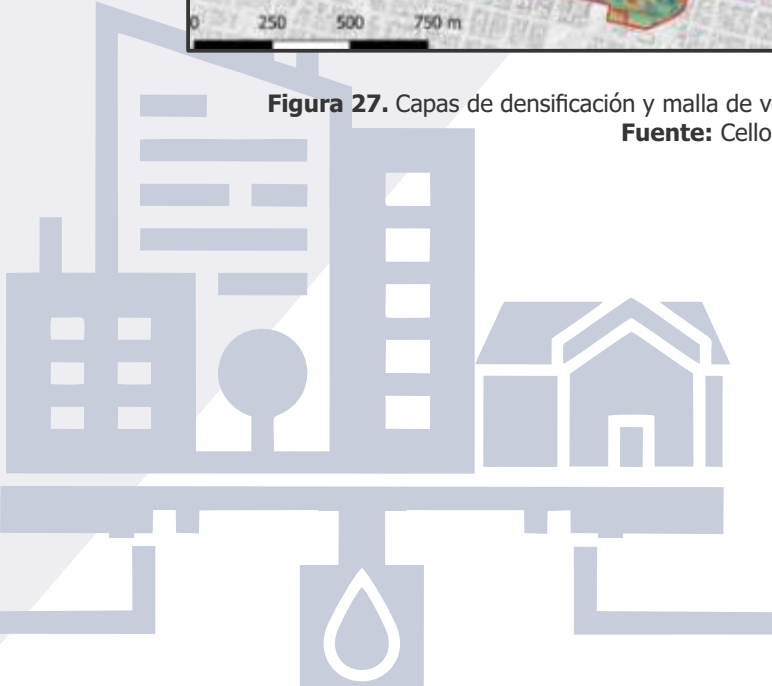


Figura 27. Capas de densificación y malla de volúmenes finitos, modelo del Barrio Transporte.
Fuente: Cello et al. (2021).



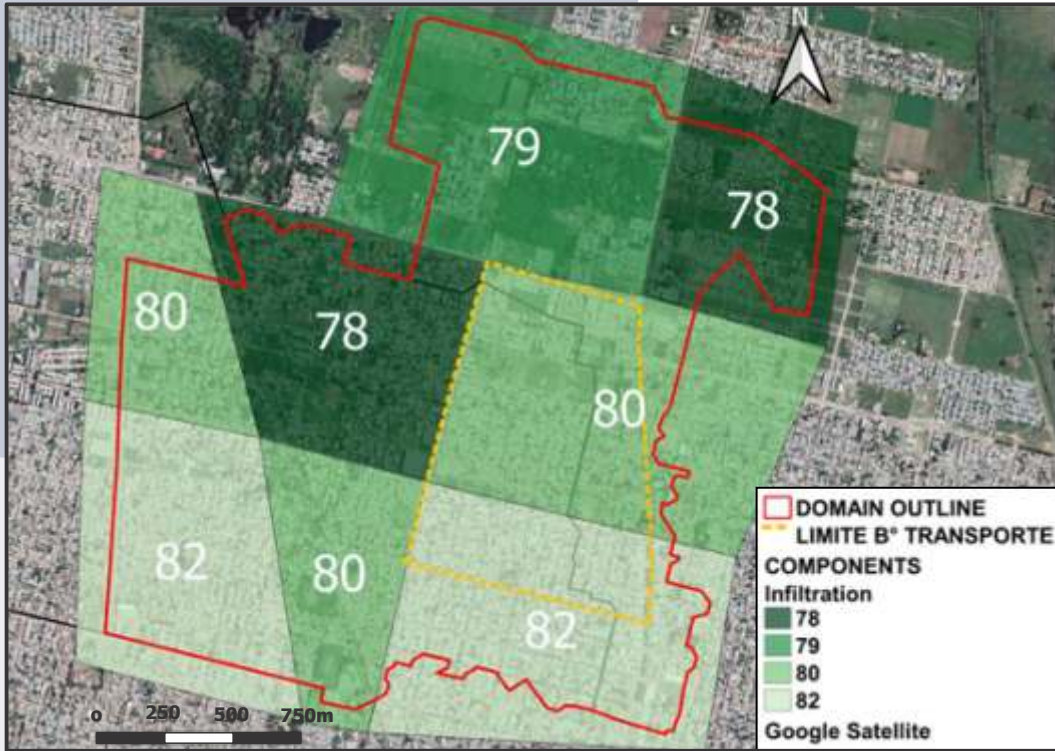


Figura 28. Zonificación del parámetro del CN del SCS para la estimación de la precipitación efectiva y las abstracciones por infiltración. Subcuenca del Barrio Transporte.

Fuente: Cello et al. (2021).



Figura 29. Zonificación del coeficiente de rugosidad n de Manning. Subcuenca del Barrio.

Fuente: Cello et al. (2021).

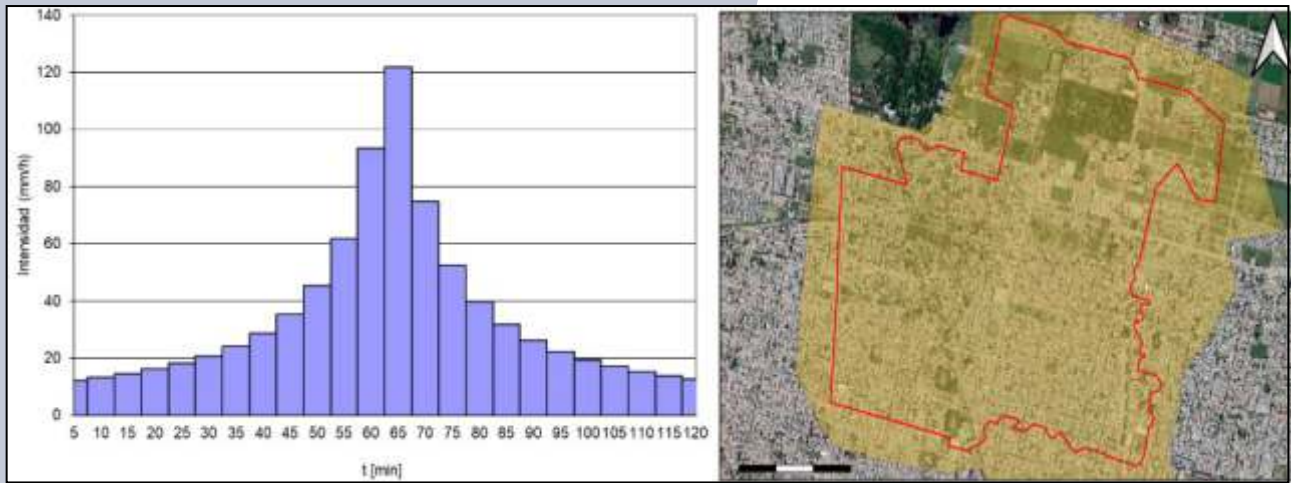


Figura 30. Definición del polígono asociado al hietograma de la tormenta de diseño. Subcuenca del Barrio Transporte.
Fuente: Cello et al. (2021).

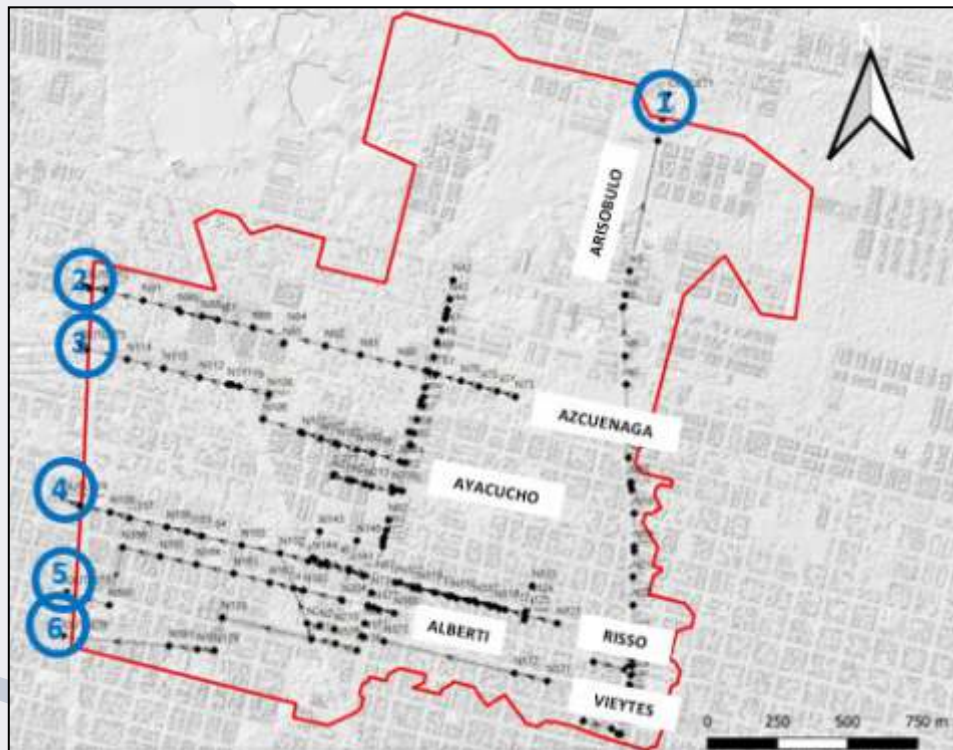


Figura 31. Red de drenaje representada para la subcuenca del Barrio Transporte.
Fuente: Cello et al. (2021).

La red de drenajes que se muestra en la Figura 31 cuenta con 193 nodos de los cuales 150 permiten el ingreso/egreso de flujo. El sistema de drenaje también está representado por 198 conductos de secciones circulares y vanos rectangulares. La mayoría de ellos con descargas hacia el Oeste de la cuenca Flores a través de los colectores Azcuénaga, Ayacucho, Risso, Alberti y Vieytes (Ver los círculos azules de 2 al 6, en la Figura 31) y uno hacia el Norte por el

colector Aristóbulo hacia la cuenca Roca (Ver círculo azul 1, en la Figura 31). Para todas las salidas de la red de drenaje se asignó una descarga del tipo flujo normal.

Puede observarse que el barrio transporte, en su interior, no cuenta con una red de drenaje jerarquizada, sino que es saneada por cunetas (Figura 31). Estas últimas descargan a colectores ubicados en los límites del barrio: colectores de Facundo Zuviría y Azcuénaga hacia el oeste; colector de Aristóbulo de Valle hacia el este y colector Espora hacia el sur sobre la calle Risso.

Cabe destacar que, al igual que en los casos anteriores, las bocas de tormenta y conductos anexos no fueron representados en esta instancia, quedando la tarea de incorporarlos al modelo SWMM en etapas futuras.

4.3.7 Caso 4. Intervención del Barrio Transporte incluyendo una medida estructural

En este caso se incorporan un conjunto de obras de drenaje urbano correspondientes a un proyecto de desagües pluviales, desarrollado por el Departamento de Ingeniería y Proyectos de la Municipalidad de Santa Fe, a lo largo de unas vías importantes del Barrio Transporte.

El proyecto está conformado por cuatro (4) subsistemas de drenajes que incluyen la extensión de la red de colectores sobre las calles Padre Genesio, Javier de La Rosa, Ayacucho y 1° de Mayo; representados en la Figura 32 utilizando líneas a trazos de color rojo.

Los cuatro (4) subsistemas de drenaje son los siguientes:

- El primer subsistema tiene el objeto de descargar los excedentes pluviales al desagüe Espora a lo largo de la calle Risso (Vertiente Oeste). Al colector de Padre Genesio se conectan otros dos de orden secundario. El segundo colector secundario presenta una traza NE-SO sobre calle Urquiza, se inicia en calle J. de La Rosa y conecta al colector Espora.
- El segundo subsistema de drenaje pertenece también a la Vertiente Oeste, descargando al colector Azcuénaga.
- El tercer subsistema, similar al anterior, descarga al colector principal Ayacucho (Vertiente Oeste).
- El cuarto subsistema busca drenar los excedentes pluviales de un sector de la Vertiente Este del Barrio Transporte.

Utilizando toda la información del proyecto, se procedió a incorporar los nuevos colectores al esquema topológico del modelo *EPA-SWMM*, mostrado en la Figura 31. Una vez incorporados los cambios, se procedió a correr una nueva simulación utilizando la misma estructura del modelo hidrológico, evento de lluvia, y duración de la simulación, del escenario de referencia, descrito en la sección anterior.

- Análisis de la capacidad de conducción de la red de colectores durante el evento de lluvia simulado.
- Identificación de sectores mayormente afectados bien sea por la topografía, geomorfología, edafología y/o por deficiencias en la capacidad de evacuación de la red de drenajes.
- Análisis de los impactos que generan la adopción de medidas estructurales, las cuales forman parte de las prioridades incluida en el Plan de Gobierno de la Municipalidad de Santa Fe.

4.3.8.1 Caso 1. Cuenca Estado de Israel

Los resultados obtenidos con la aplicación del modelo *HydroBID Flood* a este escenario representan el comportamiento hidrológico-hidráulico de los anegamientos en la Cuenca Estado de Israel satisfactoriamente, ya que los almacenamientos superficiales simulados se acercan a los registrados durante la ocurrencia de los eventos de tormentas en los días 3 y 4 de marzo de 2021 y 10 de abril de 2021 (Ver Figuras 33 y 34). Esta coincidencia también ha sido validada utilizando el material fotográfico incluido en documentos que describen las inundaciones ocurridas durante estos eventos. Adicionalmente, como se muestra en la Figura 35, la extensión de los anegamientos obtenidas con la aplicación del modelo presenta una buena bondad de ajuste respecto a las estimadas en la referencia INA (2015) donde se analizan otros eventos de tormentas.

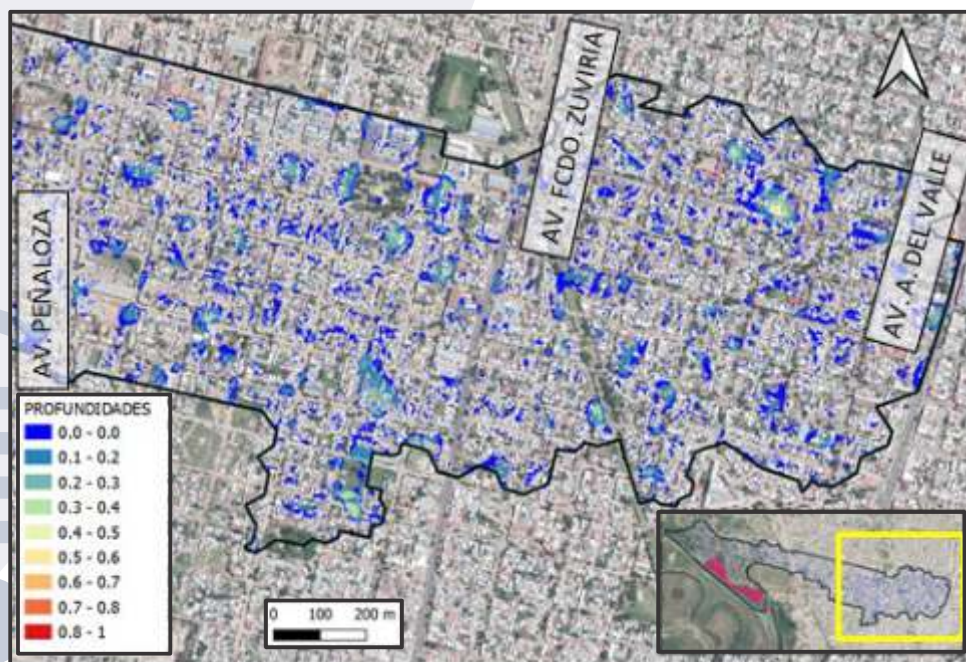


Figura 33. Almacenamiento superficial al cabo de 12 horas de simulación en la zona este. Zona delimitada por la cabecera de la cuenca Estado de Israel y Avenida Peñaloza al oeste.

Fuente: Cello et al. (2021).

Adicionalmente se analizaron los registros fotográficos que fueron tomados durante el evento del 10 de abril, en la zona de la cabecera de la cuenca, en la intersección de Castelli y 4 de enero, donde se observa un área de anegamiento simulada de hasta 0.25 m de profundidad; algo similar se observa en la intersección de Castelli entre Pje. Simoniello y San José.

La comparación entre los resultados y las diferentes fuentes de observación del fenómeno validan la eficacia del modelo para emular el proceso de precipitación-escurrimiento-anegamiento. Para esta cuenca los resultados señalan que el almacenamiento en superficie es el proceso hidrológico más relevante entre los que acontecen durante la lluvia. El escurrimiento es laminar quedando atrapado en bajos o descargando en cunetas o conductos.

La extensión y profundidades de los encharcamientos obtenidos son acordes a los observados durante este tipo de eventos con rangos de profundidades entre 0.05 m y 0.4 m. En algunas zonas aisladas, éstas llegan hasta los 0.60 m. Dentro de los sectores más comprometidos en la cabecera de la cuenca se observan encharcamientos en las intersecciones de E. Zeballos y 9 de Julio, con profundidades que llegan a los 0.55 m, y una extensión de 150 m, y el de las intersecciones de Boneo y 1° de Mayo, con una profundidad que alcanza los 0.45 m y una extensión de alrededor de 100 m (demarcados en amarillo en la Figura 36).

En la Figura 36 y 37 se muestra la localización de los anegamientos para la cuenca Estado de Israel.

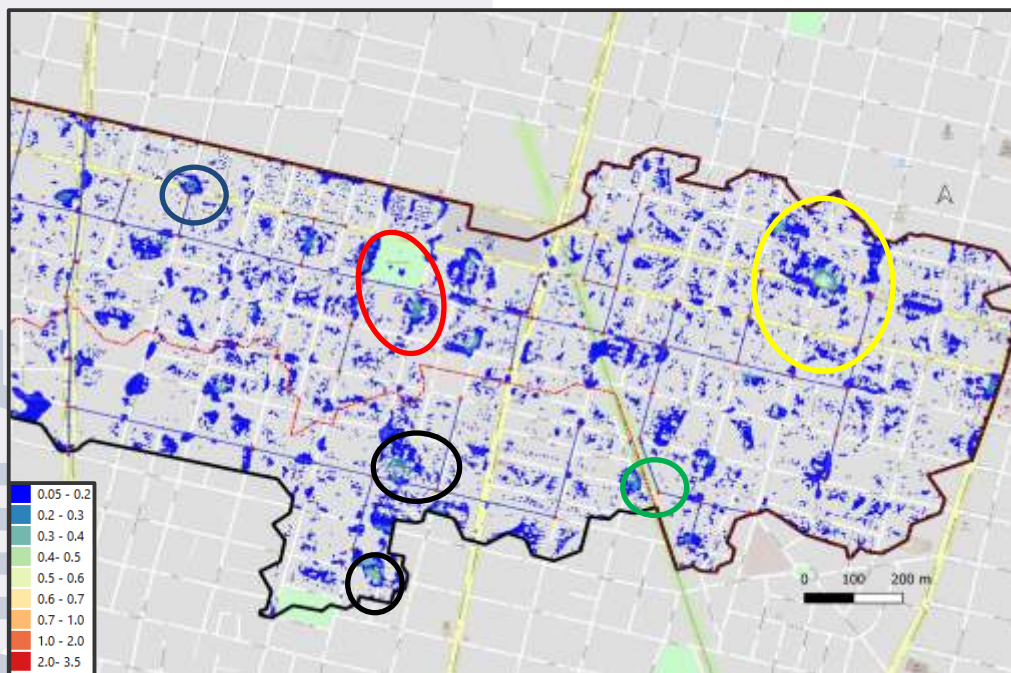


Figura 36. Áreas afectadas por el anegamiento en el sector cabecera de la cuenca Estado de Israel.
Fuente: Cello et al. (2021).

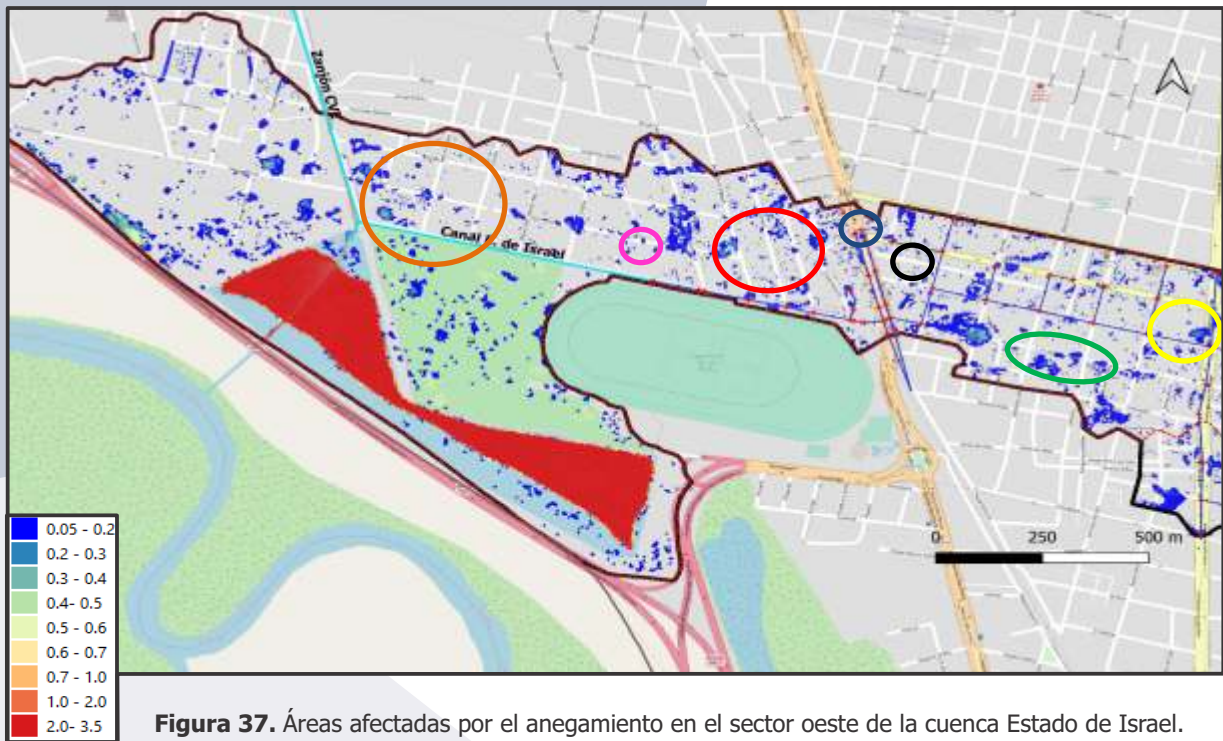


Figura 37. Áreas afectadas por el anegamiento en el sector oeste de la cuenca Estado de Israel.
Fuente: Cello et al. (2021).

A partir del análisis se concluye que, en general, los problemas de anegamiento (extensión, profundidad y permanencia) se deben a la combinación de una topografía plana con depresiones, falta de conexiones secundarias a colectores principales sobre todo en el sector oeste, y a la falta de mantenimiento de cunetas y cruces de calle. No obstante, el fenómeno de almacenamiento podría estar limitado localmente al no ser incluidas las bocas de tormenta conectadas a las cámaras en el esquema topológico de la red de drenaje. En estos casos, fueron las cámaras, los únicos nodos de transferencia de flujos entre la hidrología superficial y la hidráulica en conductos. Además, las discrepancias halladas entre el MDH y las cotas relevadas en campo en los cruces de calle podrían influenciar un tanto en la magnitud de los encharcamientos simulados.

A manera de ejemplo, en la Figura 38 se presenta la dinámica de la inundación que se genera en el sector urbanizado de la cabecera de la cuenca Estado de Israel, donde se observa que al iniciarse la lluvia comienzan a desarrollarse líneas de escurrimiento superficial (incipiente) que se dirigen hacia las zonas de descarga, luego parte del exceso de agua de lluvia (que no se infiltra) comienza a acumularse en área deprimidas, una vez superada la capacidad de almacenamiento de esas áreas el agua desborda conectándose con otros sectores anegados moviéndose en el sentido de la pendiente del terreno.

Otro tipo de resultados que se obtiene con la aplicación del modelo hidrodinámico corresponde al comportamiento hidráulico de los colectores que integran la red secundaria de drenaje urbano. A modo de ejemplo, en la Figura 39 se muestra el comportamiento hidráulico del conducto Hernandarias desde su cabecera hasta su descarga al colector Estado de Israel,

trabajando por gravedad durante toda la simulación.

Finalmente, también a manera de ejemplo, en la Figura 40, se muestra el hidrograma de descarga que se trasvasa, por gravedad, desde el reservorio hacia el Río Salado, a través de la estructura hidráulica ubicada a nivel de la Estación de Bombeo N° 5.

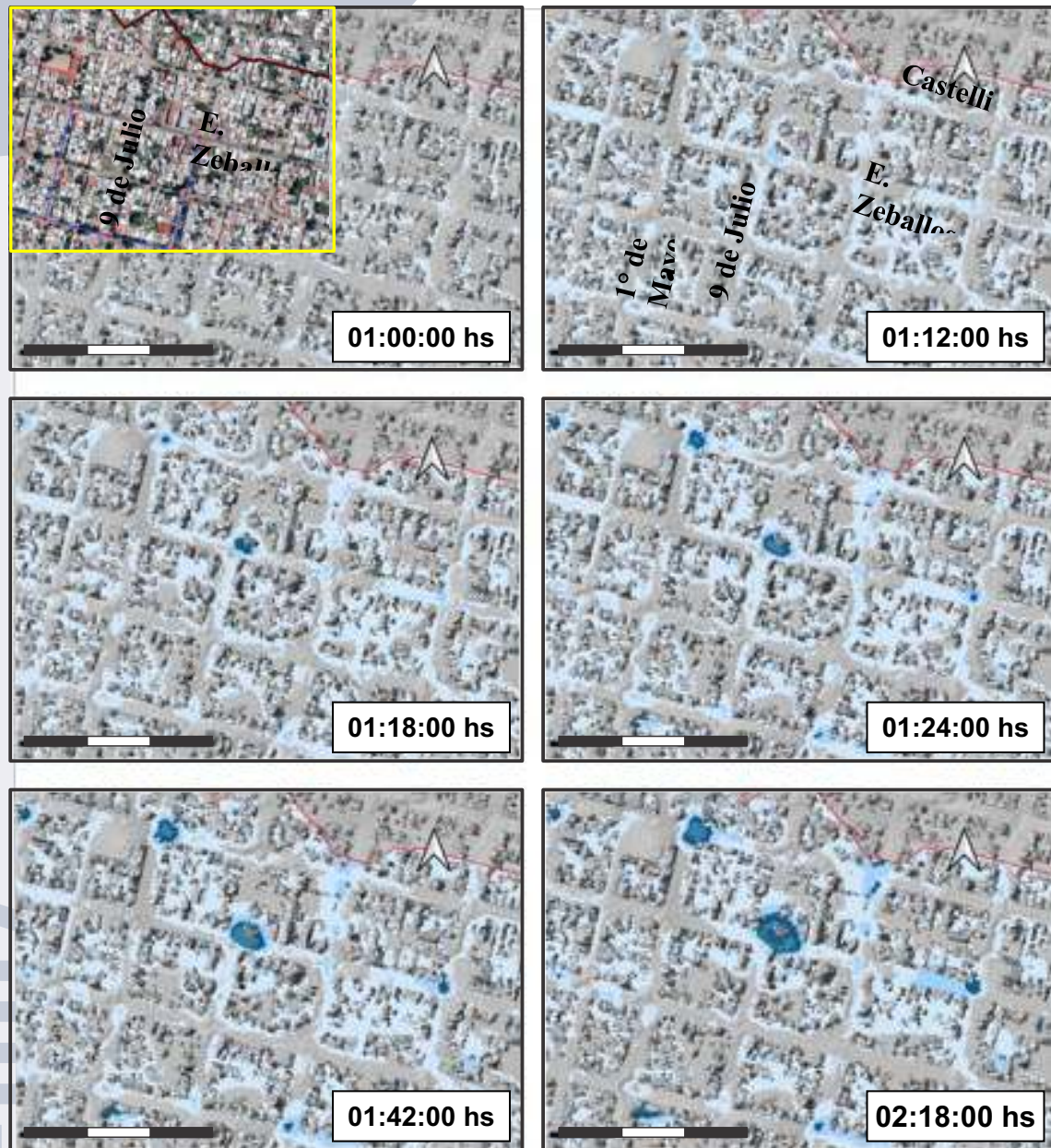


Figura 38. Dinámica del proceso de inundación en un sector urbanizado ubicado en la cabecera de la cuenca Estado de Israel.

Fuente: Cello et al. (2021).

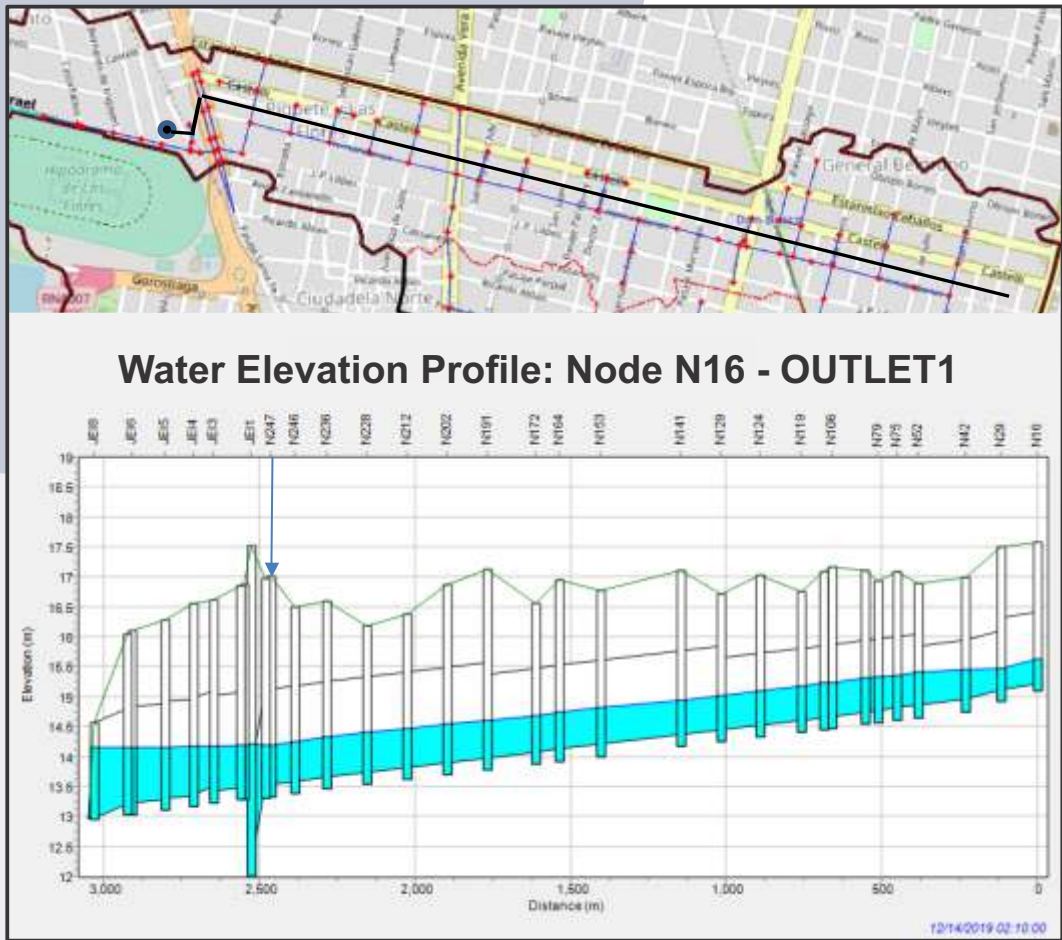


Figura 39. Perfil de la cota de agua que se genera en el conducto Hernandarias durante el tránsito del caudal máximo. Cuenca Estado de Israel. **Fuente:** Cello et al. (2021).

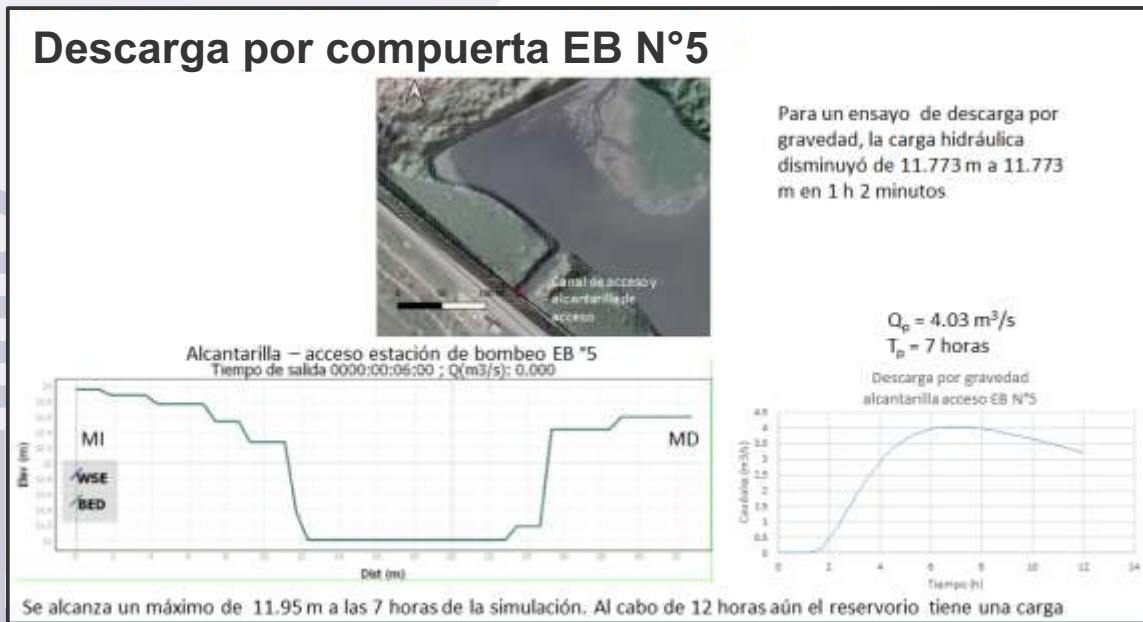


Figura 40. Descarga por gravedad desde el reservorio hacia el Río Salado. Cuenca Estado de Israel. **Fuente:** Cello et al. (2021).

4.3.8.2 Caso 2. Cuenca Estado de Israel incorporando el Colector J.P. López y conductos secundarios

Como fue descrito en la sección 4.3.5 de este documento la incorporación del Colector J.P. López y conductos secundarios se propuso a los fines de mejorar la capacidad de evacuación de los anegamientos en el sector norte del Barrio Hipódromo.

En la Figura 41 se muestran los resultados de la simulación de la cuenca Estado de Israel considerando la construcción de este colector y conductos secundarios, mientras que en la Figura 42 se realiza la comparación del efecto que tiene la presencia de la obra donde se puede observar que el resultado refleja una significativa disminución del anegamiento.

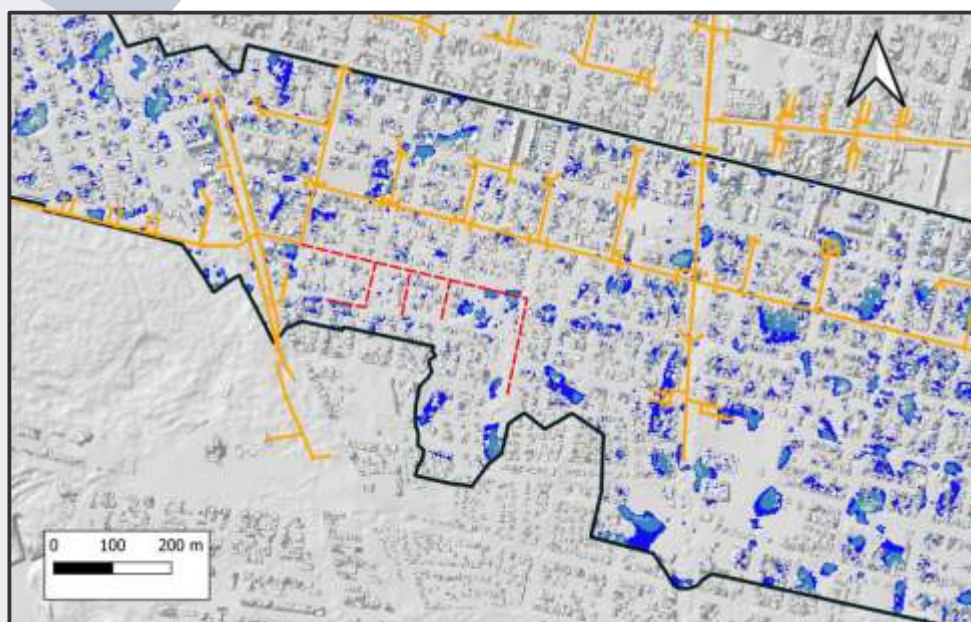


Figura 41. Efecto del Colector J.P López y conductos secundarios sobre las profundidades de inundación a las 12 horas de simulación. Cuenca Estado de Israel. **Fuente:** Cello et al. (2021).

En la Figura 42 se observa que en la intersección de las calles Estrada y J.P. López, la incidencia es significativa. La mancha que se extiende por 160 m desde Aguado hasta Estrada, con profundidades de hasta 0.50 m, es prácticamente evacuada por los nuevos conductos. Un poco más hacia el norte, a lo largo de la calle Estrada entre Hernandarias y Castelli, se observa una disminución, aunque menos notable, en la extensión de áreas afectadas por anegamiento.

- De la misma manera, en la calle J.P. López, entre Gaboto y Lamadrid y en la manzana comprendida entre J.P. López, Gaboto, Lamadrid y Cassanello, se observa una disminución en la extensión del área de encharcamiento y de su profundidad en alrededor de 0.1 m.

También se pueden identificar cambios importantes en la manzana limitada por las calles J.P. López, Solís, Cassanello y Lamadrid.

Durante el estudio se analizó también la incidencia de la intervención en el comportamiento local de la red de desagües pluviales, analizando el hidrograma que se genera en el tramo final denominado NJPL1, donde se observa un aumento del caudal pico.

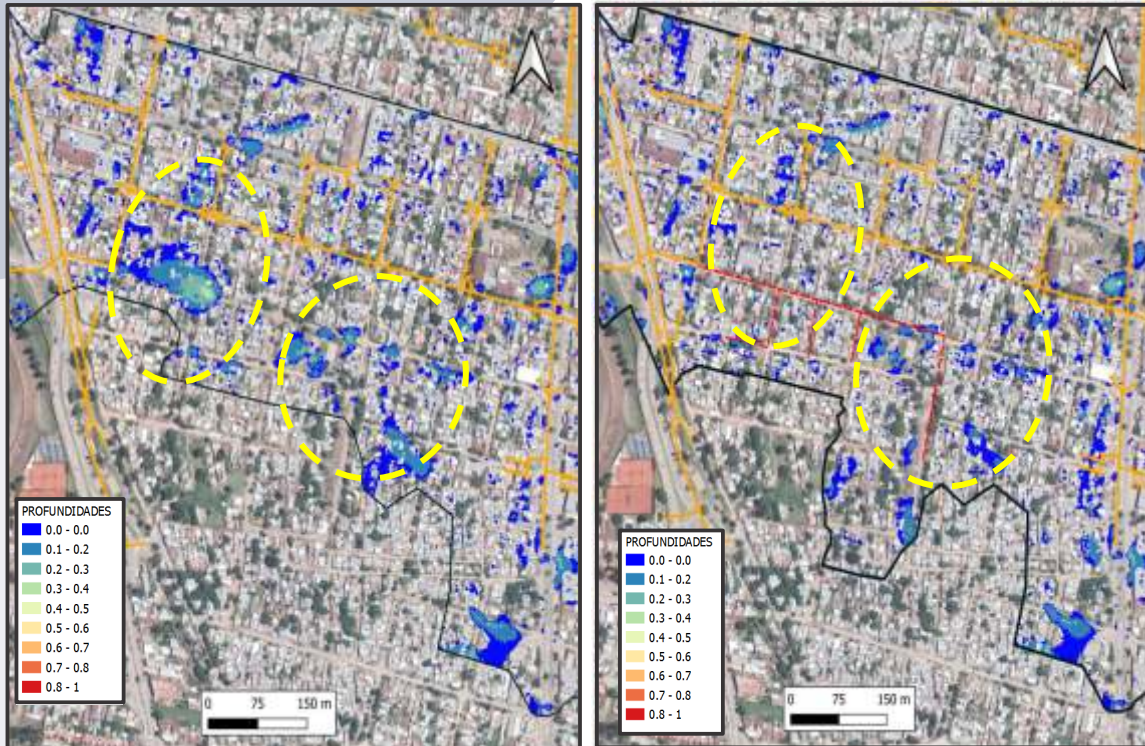


Figura 42. Detalle del área drenada por el colector J.P. López y conductos secundarios. Escenario de Intervención, cuenca Estado de Israel. En la imagen izquierda situación antes de la construcción de la obra y en la derecha situación después de la construcción. **Fuente:** Cello et al. (2021).

4.3.8.3 Caso 3. Barrio Transporte bajo la condición actual. Escenario de referencia

En la Figura 43 se presenta el resultado de la aplicación del modelo HydroBID Flood, utilizando el dominio de cálculo definido para el Caso 3 y toda la información básica que se requiere para ejecutar el modelo, según se describe en la sección 3.3.6. En esta figura se observa el almacenamiento superficial que se genera al cabo de 12 horas de simulación, mostrándose una leyenda que define las profundidades de los anegamientos.

Los resultados obtenidos con la aplicación del modelo representan satisfactoriamente el comportamiento hidrológico - hidráulico que generan los anegamientos observados en esta zona, ya que coinciden con la información fotográfica que refleja las extensiones de los anegamientos, testimonios de los residentes de la zona y la información que recoge los reclamos realizados por la ciudadanía después de la ocurrencia de los eventos de marzo y abril de 2021. En la Figura 44 se muestra la comparación de las zonas críticas definidas por INA (2015) vs. Anegamientos simulados por el modelo.

En la Figura 45 se muestra la evolución del anegamiento durante el evento de precipitación.

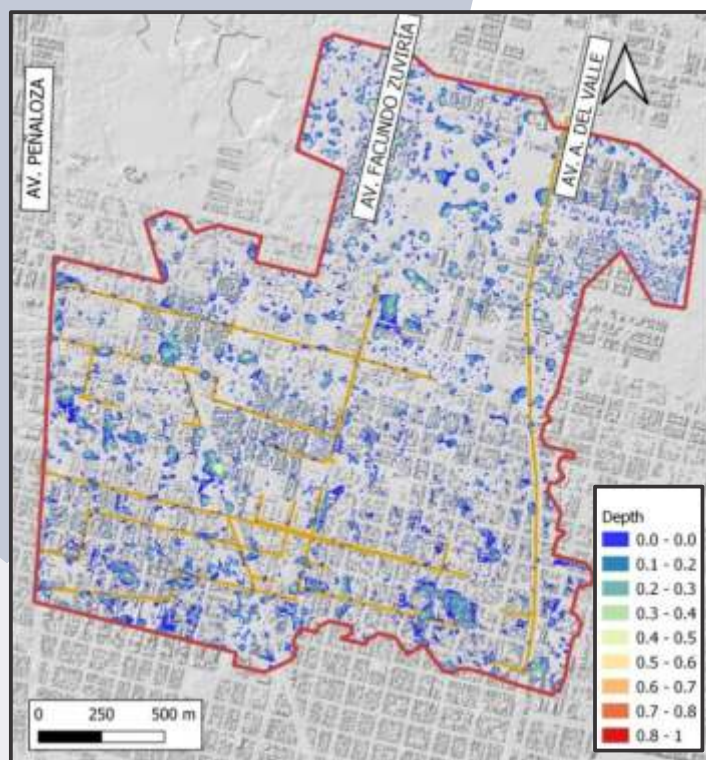


Figura 43. Almacenamiento superficial generado después de 12 horas de simulación, en el dominio de cálculo que incluye el Barrio Transporte. **Fuente:** Cello et al. (2021).

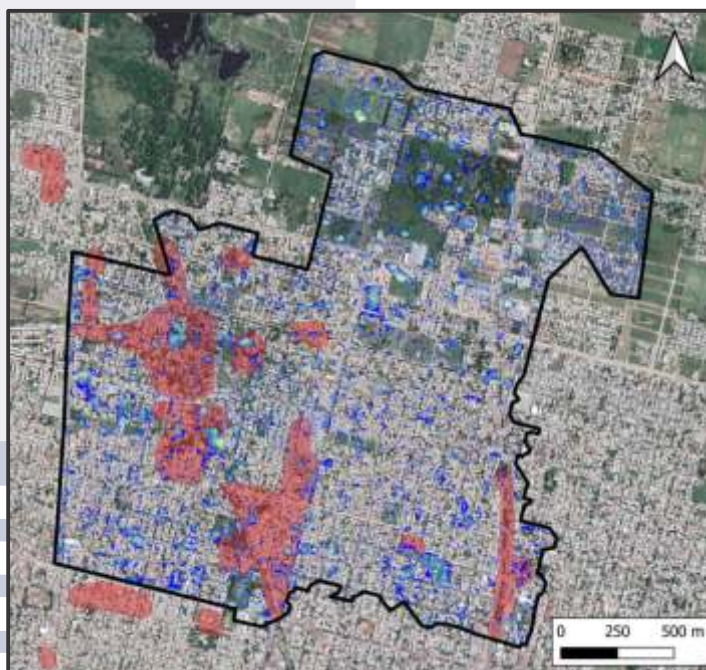


Figura 44. Almacenamiento superficial generado después de 12 horas de simulación, en el dominio de cálculo que incluye el Barrio Transporte. **Fuente:** Cello et al. (2021).



Figura 45. Evolución del anegamiento durante el evento de precipitación. Barrio Transporte.
Fuente: Cello et al. (2021).

Los almacenamientos observados pueden deberse, en primer lugar, a la configuración de la topografía caracterizada por bajos que impiden la conectividad del flujo. Además, la casi inexistente red de conductos secundarios conectados a colectores principales coloca a las cunetas como principales medios de descarga de los excedentes del barrio. Éstas, en general no se encuentran en condiciones óptimas de mantenimiento, incrementándose aún más el riesgo por anegamiento.

Algunos sectores se ven claramente afectados por deficiencias en la capacidad de conducción de colectores como en el caso de los encharcamientos observados a lo largo de Aristóbulo del Valle.

Cabe mencionar que los tiempos de permanencia de los anegamientos podrían estar exagerados por el modo en que el método CN estima la infiltración. En efecto, el método estima una pérdida de infiltración durante el tiempo en el que acontece la lluvia y que es igual a cero una vez que finalizó el evento. Por ello, luego de 2 horas, las áreas anegadas estarían impedidas al drenaje hacia el subsuelo.

4.3.8.4 Caso 4. Barrio Transporte incorporando nuevos conductos

En este caso, a la red de drenajes existente en el Barrio Transporte se le incorporaron nuevos conductos sobre la calle Primero de Mayo con sentido norte sur, y sobre las calles Ayacucho, Javier de La Rosa y Padre Genesio, de este a oeste.

En la Figura 46 se muestra el resultado de aplicar el modelo hidrodinámico considerando los nuevos conductos, donde se puede observar el impacto generado, el cual se traduce en una reducción tanto de la extensión de los anegamientos como de su profundidad.

En la Figura 47 se muestra una comparación del Escenario de Referencia con el escenario que incluye los colectores proyectados, donde se puede observar que la disminución de la superficie anegada es significativa en las intersecciones de Matheu y Primero de Mayo (círculo rojo), Pavón y Primero de Mayo (círculo negro) y Javier de La Rosa entre Urquiza y Av. Facundo Zuviria (círculo amarillo). Las profundidades disminuyen en promedio 0.10 m.



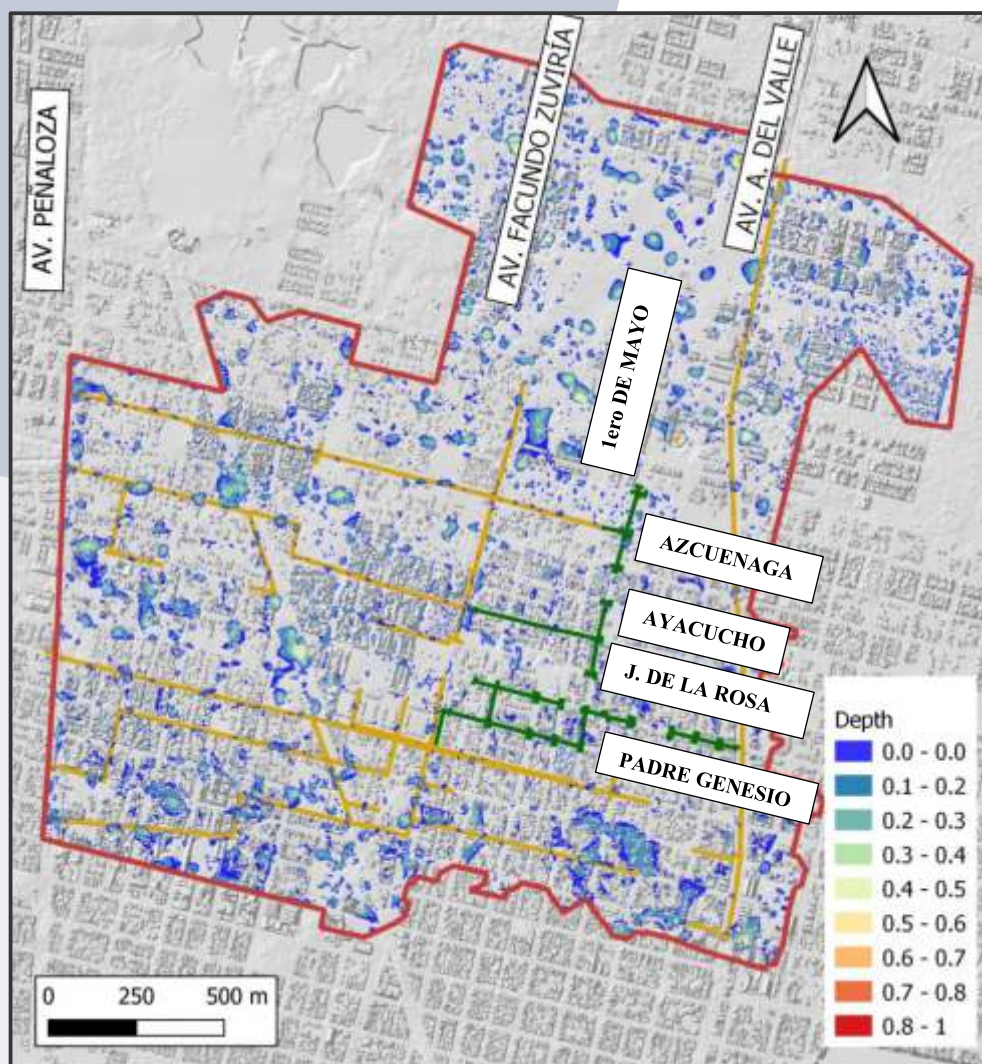


Figura 46. Almacenamiento superficial al cabo de 12 hs. de simulación. En traza amarilla se indican los conductos existentes y en traza verde los conductos proyectados. Barrio Transporte.
Fuente: Cello et al. (2021).

En la Figura 48 se presenta la comparación Escenario de Referencia con el escenario que incluye los colectores proyectados donde se observa el impacto del subsistema de colectores J. de La Rosa - Genesio sobre el entorno de la avenida Facundo Zuviría entre Javier de la Rosa y Risso.

Según estos resultados en la zona de la Av. Facundo Zuviría la incidencia es mayor. La permanencia de agua que se produce a lo largo de dos cuadras, desde Javier de La Rosa hasta Risso, con profundidades de hasta 0.40 m, disminuye notablemente.

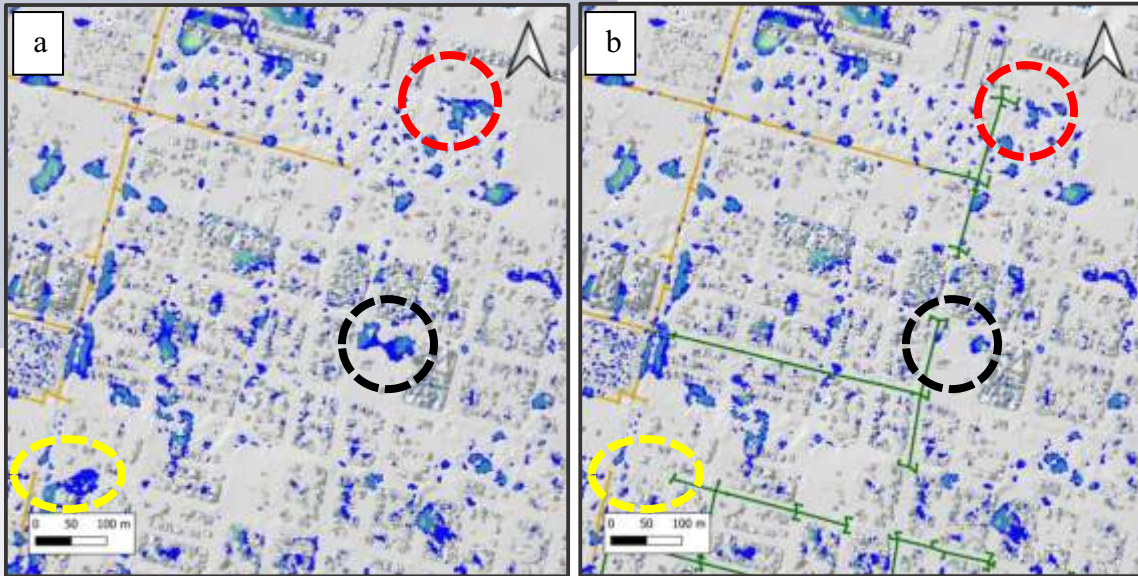


Figura 47. Comparación Escenario de Referencia (a) vs. Escenario con colectores proyectados (b). Impactos en el entorno de los colectores que descargan al Azcuénaga, al Ayacucho y al Genesis. Barrio Transporte.
Fuente: Cello et al. (2021).

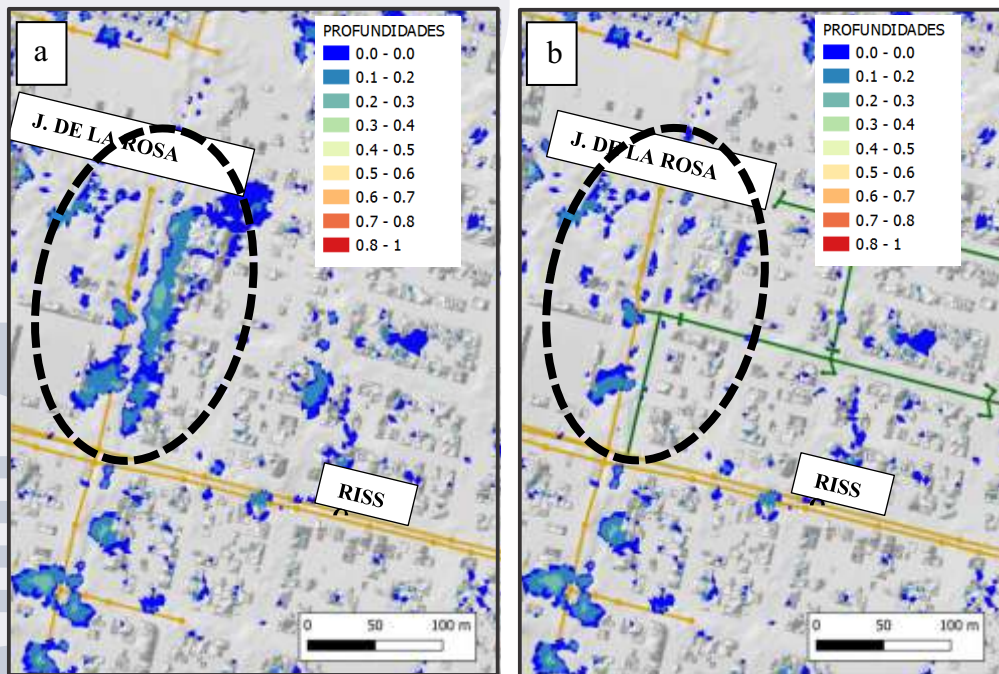


Figura 48. Comparación Escenario de Referencia (a) vs. escenario con colectores proyectados (b). Impacto del subsistema de colectores J. de la Rosa - Genesis sobre el entorno de la avenida Facundo Zuviría entre Javier de la Rosa y Risso.
Fuente: Cello et al. (2021).

4.4 PROPUESTA DE CORRECCIÓN DEL MODELO MDH A LOS FINES DE MEJORAR LA GEOMETRÍA DE LAS CALZADAS DEL SISTEMA VIAL UTILIZANDO MODELOS 3D

En la cuenca Estado de Israel, en general, los problemas de anegamiento (extensión, profundidad y permanencia) se deben a la combinación de una topografía plana con depresiones, falta de conexiones secundarias a colectores principales sobre todo en el sector oeste, y a la falta de mantenimiento de cunetas y cruces de calle. No obstante, el fenómeno de almacenamiento podría estar limitado localmente al no ser incluidas las bocas de tormenta conectadas a las cámaras en el esquema topológico de la red de drenaje. En estos casos, fueron las cámaras, los únicos nodos de transferencia de flujos entre la hidrología superficial y la hidráulica en conductos. Además, las discrepancias halladas entre el MDH y las cotas relevadas en campo en los cruces de calle podrían influenciar un tanto en la magnitud de los encharcamientos simulados.

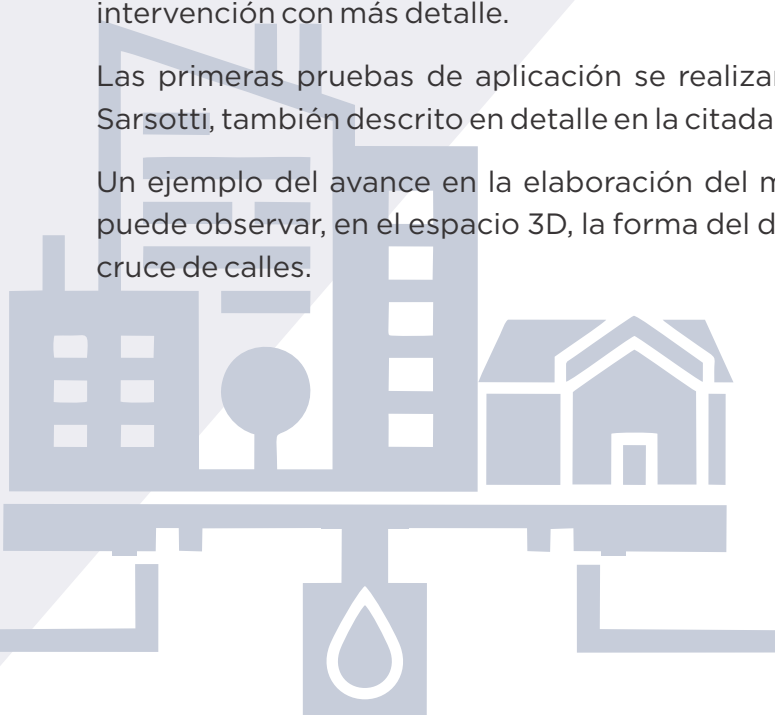
Por este motivo, para las futuras aplicaciones del modelo hidrológico-hidráulico *HydroBID Flood*, en otras cuencas de la ciudad, en la Municipalidad de Santa Fe se ha comenzado a trabajar en una metodología que permita sistematizar la corrección del modelo digital de terreno a fin de plasmar las intervenciones en la calzada del sistema vial (veredas, cordón-cuneta, calzadas y cruces).

El diseño hidráulico de los conductos trae aparejado una modificación de la topografía del terreno, lo cual altera la dinámica hídrica superficial. Es sumamente necesario, con antelación a la ejecución de la obra, poder plasmar esos cambios en el terreno conjuntamente con la obra hidráulica, a fin de realizar una correcta representación del sistema.

Para ello se llevaron a cabo una serie de pasos para la elaboración de un modelo 3D de vereda - cordón - cuneta - calzada, los cuales se describen en detalle en la mencionada referencia. Este producto acoplado al modelo digital de terreno permite obtener la topografía del área de intervención con más detalle.

Las primeras pruebas de aplicación se realizarán en el caso de estudio del barrio Varadero Sarsotti, también descrito en detalle en la citada referencia.

Un ejemplo del avance en la elaboración del modelo 3D se ilustra en la Figura 49, donde se puede observar, en el espacio 3D, la forma del diseño de vereda - cordón - cuneta - calzada y el cruce de calles.



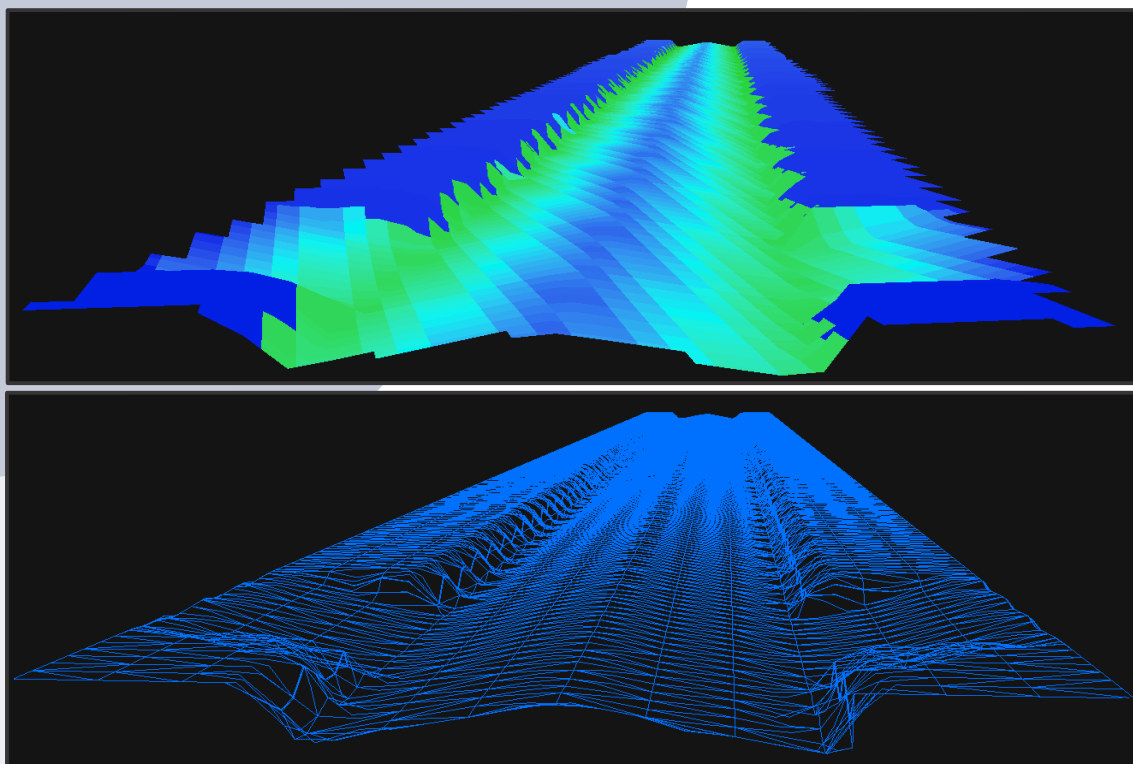


Figura 49. Visualización 3D del producto generado.
Fuente: Cello et al. (2021).



4.5 CONCLUSIONES

En la ciudad de Santa Fe, se ha registrado un aumento en la densidad demográfica en las últimas décadas, a razón del traslado de pobladores rurales a los polos urbanos. Este aumento se debe principalmente a las dificultades por las que atraviesan las economías regionales. Más en detalle, se ha observado que la disyuntiva económica-social ha motivado el asentamiento en la zona periurbana menos costosa.

Como consecuencia, el crecimiento de la ciudad ha sido desordenado, caracterizado por asentamientos espontáneos y carentes de un plan de desarrollo urbano sustentable.

El avance sobre espacios verdes y el incremento del área impermeable ha generado un aumento en el volumen y patrón de escorrentía. Sumado a ello, la capacidad insuficiente de la red de desagües para evacuar los excedentes pluviales y, en algunos casos, la falta de conexiones secundarias, o incluso la inexistencia de conducto alguno, a motorizado un aumento de áreas afectadas por anegamiento.

También, el cambio climático ha impactado significativamente sobre el régimen de precipitaciones y las crecidas del río Salado y del río Paraná, generando impactos catastróficos por desborde los ríos y/o anegamientos por lluvias intensas cada vez más frecuentes.

Es necesario entonces, profundizar el conocimiento sobre las causalidades de tales fenómenos, el impacto sobre la sociedad y las herramientas para identificar lineamientos estratégicos con miras a mitigar el riesgo hídrico cada vez más creciente.

Lo antes expuesto a motivado a la Dirección Ejecutiva de Gestión Avanzada del Gobierno Municipal de la ciudad de Santa Fe a elaborar un marco tecnológico de avanzada que combina el monitoreo y transmisión a tiempo real de variables hidrometeorológicas con la modelación hidrológica-hidráulica 2D mediante la aplicación de la herramienta HydroBID-Flood y su módulo de drenaje urbano. El desarrollo tecnológico pudo ser posible gracias al apoyo del CeSH/BID, que aportó la herramienta y el seguimiento técnico del grupo de Hydronia LLC.

HydroBID-Flood fue aplicado a la cuenca Estado de Israel y a la subcuenca del Barrio Transporte para dos escenarios diferentes: a) escenario de referencia que buscó emular el comportamiento hidrológico-hidráulico de ambos sistemas para la red de desagüe existente e identificar las áreas críticas afectadas por anegamiento; b) escenario correspondiente a medidas de intervención de tipo estructural.

Para ambos escenarios se consideró una precipitación de TR = 2 años y duración d = 2 horas.

Escenario de referencia (Caso 1 y Caso 3)

Para los escenarios de referencia, el patrón de escorrentía fue capturado y las áreas afectadas por anegamiento coincidieron, en más de un 80 %, con los reclamos de la ciudadanía relativos a ingreso de agua al Domicilio. Igualmente, la información fotográfica tomada durante el evento de lluvia de abril de 2021 avala los resultados obtenidos, como así también, la correspondencia observada con las manchas presentadas en el informe de áreas críticas del INA (2015).

En general, los problemas de anegamiento (extensión, profundidad y permanencia) se deben a la combinación de una topografía plana con depresiones, falta de conexiones secundarias a colectores principales sobre todo en el sector oeste, y a la falta de mantenimiento de cunetas y cruces de calle.

No obstante, el fenómeno de almacenamiento podría estar limitado localmente al no ser incluidas las bocas de tormenta conectadas a las cámaras en el esquema topológico de la red de drenaje. En estos casos, fueron las cámaras, los únicos nodos de transferencia de flujos entre la hidrología superficial y la hidráulica en conductos. Además, las discrepancias halladas entre el MDH y las cotas relevadas en campo en los cruces de calle podrían influenciar un tanto en la magnitud de los encharcamientos simulados.

En detalle, para el escenario de referencia y para la cuenca Estado de Israel, se identificaron almacenamientos de agua en superficie de relativa importancia (entre 0.4 m y 0.5 m) en los siguientes sectores: intersección de las calles Estanislao Zevallos y 9 de Julio; a lo largo de la calle J.P. López, entre Aguado y Estrada, y entre Gaboto y Lamadrid; Pasaje Marsengo entre Hernandarias y Castelli, López entre Marsengo y Saavedra, Gob. Freyre entre Hernandarias y Castelli, Peñalosa entre Hernandarias y Castelli, Castelli y San José, La manzana limitada por P de Vega, San Lorenzo, Aldao y Saavedra. Hacia el oeste de la Avenida Blas Parera, se pueden mencionar los encharcamientos de Blas Parera y Castelli; a lo largo del pasaje Santa Fe (FFCC), en la intersección de las calles Castelli y Cervera; en las inmediaciones de Hernandarias y Gastañaduy y Gastañaduy entre Hernandarias y Castelli. Se suman también anegamientos en las intersecciones de Hernandarias y Larguía, Ignacio Crespo y Hernandarias, y en sectores comprendidos entre Castelli, CVE, Estado de Israel y e Ignacio Crespo.

Los colectores principales trabajan a gravedad a lo largo de la simulación, con excepción de algunos conductos de orden secundario de poca envergadura.

Los sectores antes mencionados, para esta cuenca y escenario, requieren un saneamiento integral que incluye el diseño y ejecución de conductos secundarios anexos a los existentes y/o intervenciones de bajo impacto, sustentables desde los puntos de vista socioeconómico y ambiental.

Para el caso de la subcuenca del Barrio Transporte, ocurre similar panorama. Se identificaron áreas críticas en el sector norte y centro-norte en coincidencia con terrenos bajos; asimismo, se observaron anegamientos a la vera de la Avenida Facundo Zuviría, en particular, entre las calles E. Zevallos y Javier de la Rosa y más al norte, en las intersecciones con la calle French y la avenida Gorriti. Los anegamientos identificados a lo largo de la Avenida Aristóbulo del Valle responden a la falta de capacidad del colector que se desarrolla por esta avenida para evacuar los excedentes del área de aporte.

El terraplén del Ferrocarril constituye una clara interferencia al escurrimiento, con agua almacenada en varios sectores a lo largo de su traza. Al oeste de dicho terraplén se suman áreas afectadas de importancia tales como aquellos a lo largo de las calles San José, Espora, Genesio, Javier de la Rosa y Santiago de Chile, Regimiento 12 de Infantería y Pavón.

Los colectores principales representados para esta subcuenca descargan por gravedad, con excepción del de Avenida Aristóbulo del Valle que trabaja a presión durante un lapso importante del tiempo de simulación con derrames que complican el estado de anegamiento de las áreas circundantes. Las mayores descargas se dan por los conductos Azcuénaga, Espora y A. del Valle.

En particular dentro de los límites oficiales del Barrio transporte, no existe un sistema desagües jerarquizado (salvo el colector Azcuénaga) y sus excedentes pluviales se descargan por cuneta a conductos ubicados a lo largos de los límites este, sur y oeste.

Escenarios con intervención (Caso 2 y Caso 4)

Los resultados obtenidos, para este escenario, fueron satisfactorios para ambas áreas de estudio. Se observaron cambios significativos en los alrededores donde se implementan las intervenciones. Pueden destacarse una significativa disminución de las manchas, tanto en extensión como en profundidad y tiempo de permanencia, a lo largo de la calle J.P. López (Caso 2), como en el entorno de las calles Genesio-Javier de la Rosa-Facundo Zuviría (Caso 4). Las capacidades de la herramienta HydroBID-Flood facilitaron significativamente el diagnóstico del comportamiento hidrológico-hidráulico de las áreas analizadas, la identificación de sectores críticos y el impacto de las medidas de intervención sobre la dinámica hídrica superficial y en conductos. Los resultados satisfactorios alientan continuar con el uso de la herramienta para facilitar la gestión integral de las cuencas urbanas y apoyar tareas de otras Secretarías de la Municipalidad con incumbencias claves para la planificación desde un punto de vista interdisciplinar.

En el futuro se espera cumplir con las siguientes etapas:

- Calibración de modelos a partir de datos suministrados por la Red de Telegestión.
- Diseño de obras hidráulicas en forma conjunta con obras civiles, incorporando el modelo 3D vereda-cordón-cuneta-calzada al MDH.
- Actualización del Plan Director de Desagües Pluviales (PDDP) de la ciudad, aplicando la herramienta HydroBID-Flood, a otras cuencas de ejido urbano.

Vinculación el modelo matemático con la red de monitoreo a los fines de simulación de eventos a tiempo real o eventualmente para usarlo como herramienta de pronóstico.



5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Banco Interamericano de Desarrollo. 2020. De Estructuras a Servicios: El camino a una mejor infraestructura en América Latina y el Caribe. <https://flagships.iadb.org/es/DIA2020/de-estructuras-a-servicios>

Bertoni, J. C. et al. 2004. Urban flooding in Argentina. GWP-UNC-Argentina, Cap.-Net-CPCNA. Córdoba. ISBN N° 987-9406-76-1.

Cello P., Gagliardi M.P., Burne A., Mendizabal S., Morel M., Quirogra G., y R. Salvadores. 2021. Proyecto piloto de drenaje urbano utilizando HydroBID Flood en la Ciudad de Santa Fe, Argentina. Convenio de soporte técnico - Centro de Soporte HydroBID para América Latina y El Caribe. División de Agua y Saneamiento. Banco Interamericano de Desarrollo, BID. Dirección Coordinación y Gestión Avanzada-Secretaría de Asuntos Hídricos y Gestión de Riesgos_Municipalidad de la Ciudad de Santa Fe, Argentina.

Cello P. 2021. Talleres de Capacitación y Consultoría para el Proyecto Piloto de Drenaje Urbano utilizando Hydrobid-Flood en la ciudad de Santa Fe, Argentina. Resultados. Presentación en PowerPoint. Convenio de soporte técnico - Centro de Soporte HydroBID para América Latina y El Caribe. División de Agua y Saneamiento. Banco Interamericano de Desarrollo, BID. Dirección Coordinación y Gestión Avanzada-Secretaría de Asuntos Hídricos y Gestión de Riesgos_Municipalidad de la Ciudad de Santa Fe, Argentina.

EPA-SWMM. 2020. SWMM. Storm Water Management Model v. 5.1015. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>

Etulain, J.C. and López, I. 2017. Urban flooding: Risk maps and territorial urban planning guidelines. Theoretical-methodological background and purposes. Estudios del Habitat Vol. 15 N°. 2.

González, S. et al. 2015. Urban flooding and climate change. Watershed management recommendations. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. Ciudad de Buenos Aires, Argentina.

Hydronia LLC, 2020. HydroBID Flood: Manual de Referencia. Banco Interamericano de Desarrollo. <https://publications.iadb.org/es/hydrobid-flood-manual-de-referencia-version-20>

INA. 2015. Estudio de zonas críticas por inundaciones frecuentes en la ciudad de Santa Fe. Informe Final. Convenio Marco Municipalidad de Santa Fe- Instituto Nacional del Agua.

■ López, J.L., 2020. Riesgo climático y definición de estrategias financieras para su mitigación en el sector de agua y saneamiento en ALC. Inundaciones: visión general de la gestión de riesgo de inundaciones ante el cambio climático. Banco Interamericano de desarrollo. Nota técnica IDB-TN-02101. <https://publications.iadb.org/es/riesgo-climatico-y-definicion-de-estrategias-financieras-para-su-mitigacion-en-el-sector-agua-y-8>

Marcus, R.; Morresi, M.; Elizalde Carrillo, E.; Macor, J.L.; Cristina, I.M. 2016. Curvas de Duración-Intensidad-Recurrencia (IDF) de la Estación Meteorológica del CIM-FICH. Serie 1986-2016. Pasantía de Investigación Resolución CD N°289715. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. UNL.

Paoli, C.U. 2015. Integrated Flood Management. Guidelines and study cases. European Commission. Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability. European Union. ISBN 978-92-79-52199-7.

Schomwandt, D.R, Lucioni, N., and Andrade, M.I. 2016. Flooding risk maps and the representation of vulnerability in Gran La Plata, Buenos Aires. Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente. N° 36.15-28.

Sherman, C. 1931. Frequency and Intensity of Excessive Rainfall at Boston, Massachusetts. American Society of Civil Engineers. USA.



6. ANEXO 1. PROCESO DE TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA



6.1 Características de los módulos

A continuación, se listan todas las presentaciones, tanto teóricas como prácticas, que se realizaron durante la ejecución de cada uno de los dos módulos que integraron el taller.

6.1.1 Módulo I

6.1.1.1 Presentaciones teóricas

- Introducción a la modelación hidrológica e hidráulica mediante HydroBID Flood.
- Introducción a los sistemas de información geográfica SIG y modelos digitales de terreno MDT.
- HydroBID Flood en el ambiente de QGIS. Introducción al modelo HydroBID Flood.
- Conceptos básicos de Hidrología.
- Componente hidrológico del modelo HydroBID Flood.
- Generación y refinamiento de mallas con HydroBID Flood.

6.1.1.2 Sesiones prácticas

- Práctica I-1. La interfaz de usuario de QGIS.
- Práctica I-2. Importación de capas a QGIS.
- Práctica I-3. Construcción y modificación de Modelos Digitales de Elevación MDE.
- Práctica I-4. Creación de un primer Proyecto de HydroBID Flood.
- Práctica I-5. Delineación de cuencas usando QGIS.
- Práctica I-6. Estimación de variabilidad espacial de tormentas de diseño.
- Práctica I-7. Aplicación de HydroBID Flood a una cuenca piloto.

6.1.2 Módulo II

6.1.2.1 Presentaciones teóricas

- Componente Puentes. Aspectos básicos.
- Componente de Alcantarillas. Aspectos básicos.
- Componente de vertederos y compuertas. Aspectos básicos.
- Componente de Drenaje Urbano. Aspectos básicos.
- Componente de Drenaje Urbano. Integración de HydroBID Flood con EPA-SWMM.

6.1.2.2 Sesiones prácticas

- Práctica II-1. Componente de Puentes en HydroBID Flood.
- Práctica II-2. Componente Alcantarillas en HydroBID Flood.
- Práctica II-3. Componente de Vertederos (Diques) y Componente de compuertas.
- Práctica II-4. Tutorial sobre del modelo EPA SWMM.
- Práctica II-5. Ejemplo de aplicación de HydroBID Flood con el componente de Drenaje Urbano.

6.2. TALLERES DE CAPACITACIÓN GUIADA SOBRE EL USO DEL MODELO HYDROBID FLOOD EN LA MUNICIPALIDAD DE SANTA FE, ARGENTINA

Los talleres se llevaron a cabo durante trece (13) días, a través de los cuales se realizaron doce (12) sesiones teóricas y trece (13) sesiones prácticas. Los participantes a los talleres están adscritos a la Municipalidad de Santa Fe. Cada taller cubrió el contenido contemplado en los módulos del programa de capacitación (Ver aparte 2.1 y Anexos 1 y 2).

6.3 INSTRUCTORES

En la siguiente tabla se presentan las características de los instructores que participaron, por parte de la empresa Hydronia LLC, en la ejecución de los talleres, indicando sus experticias y

Nombre	Experticia	Responsabilidad
Reinaldo Garcia	Ingeniería Hidráulica, modelación, Gerencia.	Preparación de material didáctico. Gerencia del proyecto. Instructor.
Jacinto Artigas	GIS, Hidrología, Hidráulica	Preparación de material didáctico. Sistemas de información Geográfica. Modelación Hidrológica e Hidráulica. Instructor.
Jose Rafael Cordova	Hidrología, Modelación hidrológica.	Preparación de material didáctico. Modelación Hidrológica. Instructor.

6.4 UBICACIÓN

Los talleres se realizaron de forma remota mediante la plataforma de entrenamiento *GoToMeeting*. *Hydronia* proveyó a los participantes los enlaces de conexión necesarios para integrarse a cada uno de los talleres.

6.5 AGENDA DETALLADA

Pres.	9/NOV/2020	Modulo I - Día 1:
	MN	09:30 – 9:50 Presentación del Taller de HydroBID Flood por parte del BID.
M1-P1	RG	09:50 – 11:00 Introducción al a la modelación hidrológica e hidráulica mediante HydroBID Flood.
M1-P2	JA	11:15 – 1:00 Introducción a los sistemas de información geográfica SIG y modelos digitales de terreno MDT.
	11/NOV/2020	Módulo I - Día 2:
M1-P2b	JA	09:30 – 10:10 Continuación con la introducción a los sistemas de información geográfica SIG.
M1-P3		10:10 – 11:00 Práctica I-1. La interfaz de usuario de QGIS. Práctica I-2. Importando capas a QGIS.
M1-P4	JA	11:15 – 1:00 Práctica I-3. Construcción y modificación de MDT.
	13/NOV/2020	Módulo I - Día 3:
M1-P5	RG	09:30 – 11:00 HydroBID Flood en el ambiente de QGIS. Introducción al modelo HydroBID Flood.
M1-P6	JA	11:15 – 1:00 Práctica I-4. Creación de un primer Proyecto de HydroBID Flood.
	16/NOV/2020	Módulo I - Día 4:
M1-P7	Intendencia SF	09:30 – 11:00 Presentación sobre el alcance del Proyecto piloto de la ciudad de Santa Fé.
M1-P8	Intendencia SF	11:15 – 1:00 Proyecto piloto de la ciudad de Santa Fe.
	18/NOV/2020	Módulo I - Día 5:
M1-P9	JRC	09:30 – 11:00 Conceptos básicos de Hidrología.
M1-P10	JRC	10:45 – 12:30 Práctica I-5. Delineación de cuencas usando QGIS. Práctica I-6. Estimación de variabilidad especial de tormentas de diseño.
	20/NOV/2020	Módulo I - Día 6:
M1-P11	JRC	09:30 – 11:00 Componente hidrológico de HydroBID Flood.
M1-P12	JA	11:15 – 1:00 Generación y refinamiento de mallas con HydroBID Flood.
	25/NOV/2020	Módulo I - Día 7:
M1-P13	JA	09:30 – 11:00 Práctica I-7. Aplicación de HydroBID Flood a una cuenca piloto.
M1-P13b	JA	11:15 – 1:00 Práctica I-7. Aplicación de HydroBID Flood a una cuenca piloto. Continuación.

Pres.	30/NOV/2020	Módulo II - Día 1:
M2-P1	JRC	09:30 – 11:00 <i>Componente de Puentes. Aspectos básicos.</i>
M2-P2	JA	10:45 – 12:30 Práctica II-1. Componente de Puentes.
	02/DIC/2020	Módulo II - Día 2:
M2-P3	JRC	09:30 – 11:00 <i>Componente de Alcantarillas. Aspectos básicos.</i>
M2-P4	JA	11:15 – 1:00 Práctica II-2. Componente de Alcantarillas.
	04/DIC/2020	Módulo II - Día 3:
M2-P5	JRC	09:30 – 11:00 <i>Componente de vertederos y compuertas. Aspectos básicos.</i>
M2-P6	JA	11:15 – 1:00 Práctica II-3. Componente de vertederos y Componente de compuertas.
	09/DIC/2020	Módulo II - Día 4:
M2-P7	JRC	09:30 – 11:00 <i>Componente de Drenaje Urbano. Aspectos básicos.</i>
M2-P8	JRC	11:15 – 1:00 Práctica II-5. Tutorial de EPA SWMM.
	10/DIC/2020	Módulo II - Día 5:
M2-P9	RG	09:30 – 11:00 <i>Componente de Drenaje Urbano. Integración de HydroBID Flood con EPA-SWMM</i>
M2-P10	JA	11:15 – 1:00 Práctica II-6. Ejemplo de aplicación de HydroBID Flood con el componente de Drenaje Urbano.
	11/DIC/2020	Módulo II - Día 6:
M2-P10b	JA	09:30 – 11:00 Ejemplo de aplicación de HydroBID Flood con el componente de Drenaje Urbano. Continuación.
M2-P11	JRC, RG, JA	11:15 – 12:30 <i>Sesión de trabajo para preparar la información de precipitación y otros datos necesarios para el Proyecto Piloto de la ciudad de Santa Fe.</i>
	MN	12:30 – 1:00 <i>Cierre del los Módulos I y II.</i>

(*) El tiempo asignado a cada presentación incluye de 10 a 15 minutos de preguntas, aclaraciones, comentarios, etc., por parte de los participantes.

(**) Las iniciales que aparecen en esta columna corresponden a los instructores de cada sesión:

MN: Mauro Nalesso (Banco Interamericano de Desarrollo)

JA: Jacinto Artigas (Hydronia)

JRC: José Rafael Córdova (Hydronia)

RG: Reinaldo Garcia (Hydronia)

CALENDARIO DE LOS MÓDULOS I Y II

NOVIEMBRE 2020						
Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
						1
2	3	4	5	6	7	8
9 Módulo 1 día 1: 9:20-13	10	11 Módulo 1 día 2: 9:30-13	12	13 Módulo 1 día 3: 9:30-13	14	15
16 Módulo 1 día 4: 9:30-13	17	18 Módulo 1 día 5: 9:30-13	19	20 Módulo 1 día 6: 9:30-13	21	22
23	24	25 Módulo 1 día 7: 9:30-13	26	27	28	29
30 Módulo 2 día 1: 9:30-13						

Diciembre 2020						
Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
	1	2 Módulo 2 día 2: 9:30-13	3	4 Módulo 2 día 3: 9:30-13	5	6
7	8	9 Módulo 2 día 4: 9:30-13	10 Módulo 2 día 5: 9:30-13	11 Módulo 2 día 6: 9:30-13	12	13
14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31			



BID

Banco Interamericano
de Desarrollo

