



Análisis de la peligrosidad por inundación en una zona de planicie afectada por Mareas. Caso de estudio: localidad de General Daniel Cerri, Buenos Aires, Argentina

*Flood peligrity analysis over a flat area affected by tides.
Case study: General Daniel Cerri town, Buenos Aires, Argentina*

Fernández, Sandra¹

Pérez, Daniel²

¹ Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur (UNS), Bahía Blanca, Argentina. Comisión de Investigaciones Científicas, La Plata, Argentina. (<https://orcid.org/0000-0001-5430-4825>)
sfernand@uns.edu.ar

² Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur (UNS), Bahía Blanca, Argentina. (<https://orcid.org/0000-0002-1930-0957>)
perezdanielenrique@gmail.com.

RESUMEN

Palabras clave:

HEC-RAS
Peligrosidad por inundación
General Daniel Cerri
Mareas eólicas

General Daniel Cerri, a orillas del estuario de Bahía Blanca sufre inundaciones de tipo pluvial y por mareas eólicas extraordinarias. Dos cuencas desaguan a poca distancia del casco urbano y a su vez la marea ahoga los drenajes. Un anillo de obras viales y ferroviarias terraplenadas modifica la red de escurrimiento natural, generándose efectos de protección, pero a la vez retardando la evacuación debido a las mareas. Se recopilaron datos de campo, satelitales y cartas para producir un modelo de terreno. Se adoptaron condiciones de borde y se evaluó la rugosidad del terreno. Mediante el software HEC-RAS, se simularon crecidas correspondientes a tormentas de determinada recurrencia que escurren a través de las estructuras, incorporando el efecto que la marea, para definir el grado de ahogamiento. En función de los tirantes y velocidades obtenidos en la simulación se delimitaron las áreas urbanas afectadas y se definió la peligrosidad en función de estándares internacionales. Los resultados de las simulaciones permitieron describir la mecánica de la inundación en la zona y evaluar el grado de peligrosidad en las áreas afectadas basados en los valores de tirante y velocidad de inundación simulados en cada caso. Los resultados fueron volcados en mapas y develaron las zonas de inundación para las distintas recurrencias, así como el grado de peligrosidad. Existen diferencias no despreciables entre áreas inundadas simuladas con y sin mareas.

ABSTRACT

Keywords:

HEC-RAS
Flooding peligrity
General Daniel Cerri
Wind tides

General Daniel Cerri, on the shores of the Bahía Blanca estuary, suffers from pluvial floods and extraordinary wind tides. Two basins drain a short distance from the town center and in turn the tide drowns the drains. A ring of terraced road and railway works modifies the natural runoff network, generating protection effects, but at the same time delaying evacuation due to tides. Field, satellite and chart data were collected to produce a terrain model. Boundary conditions were adopted and the terrain roughness was evaluated. Floods corresponding to storms of a certain recurrence that flow through the structures were simulated, incorporating the effect of the tide,

to define the degree of drowning. Depending on the distances and speeds obtained in the simulation, the affected urban areas are delimited and the danger was defined based on international standards. The results of the simulations made it possible to describe the mechanics of the flood in the area and evaluate the degree of danger in the affected areas based on the values of depth and flood speed simulated in each case. There are non-negligible differences between simulated flooded areas with and without tides. The results were put on maps and reveal the flood zones for the different recurrences, as well as the degree of danger.

1. Introducción

Las inundaciones constituyen un peligro real para la población, los bienes y actividades económicas. Se ha verificado un incremento a nivel mundial de este tipo de eventos. En particular, se puede citar la tormenta subtropical que afectó a Bahía Blanca, Puerto Cuatreros, General Daniel Cerri (GDC) y la zona en marzo de 2022, la cual produjo inundaciones y destruyó estructuras centenarias.

La modelación en 1D/2D resulta una herramienta muy útil para evaluar la peligrosidad por inundaciones al proveer mapas de peligrosidad de inundación para eventos extremos, por ejemplo. Aplicaciones como Hidrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System [HEC-HMS] e Hidrologic Engineering Center-River Analysis System [HEC-RAS], apoyados en un Sistema de Información Geográfica [SIG], de código abierto, pueden procesar dichos mapas de peligrosidad, los cuales ayudan a los responsables del manejo de cuencas a tomar decisiones. Este proceder, ya ha sido aplicado en algunas ciudades argentinas como Pergamino ([Mattos Gutierrez et al., 2013](#)), Tandil ([La Macchia y Linares, 2021](#)), Azul ([Collazos et al., 2018](#)) y Arroyito ([Reyna et al., 2018](#)) aunque en este último, se utilizó el [EPASWMM] para simular el escurrimiento. Cabe aclarar que en ninguno de estos casos se presentó el problema del efecto de ahogamiento del escurrimiento ocasionado por la marea. [Alarcón Valenzuela et al. \(2019\)](#) realizaron una simulación en el río Biobío, Chile, en la cual incluyeron la influencia de la marea.

Ingeniero White, ciudad portuaria situada a 13 km al sudeste de GDC sobre el estuario de Bahía Blanca ([Figura 1a](#) y [1b](#)), está expuesta a mareas eólicas extraordinarias debido a las tormentas provenientes del sudeste (sudestadas) provocado la obstrucción de los sistemas de drenaje pluvial. Las escorrentías producidas por las intensas precipitaciones que suelen acompañar estos eventos, generan excedentes de escorrentía que experimentan retardos en su evacuación, confirmando características de inundación ([Aldalur, 2010](#)).

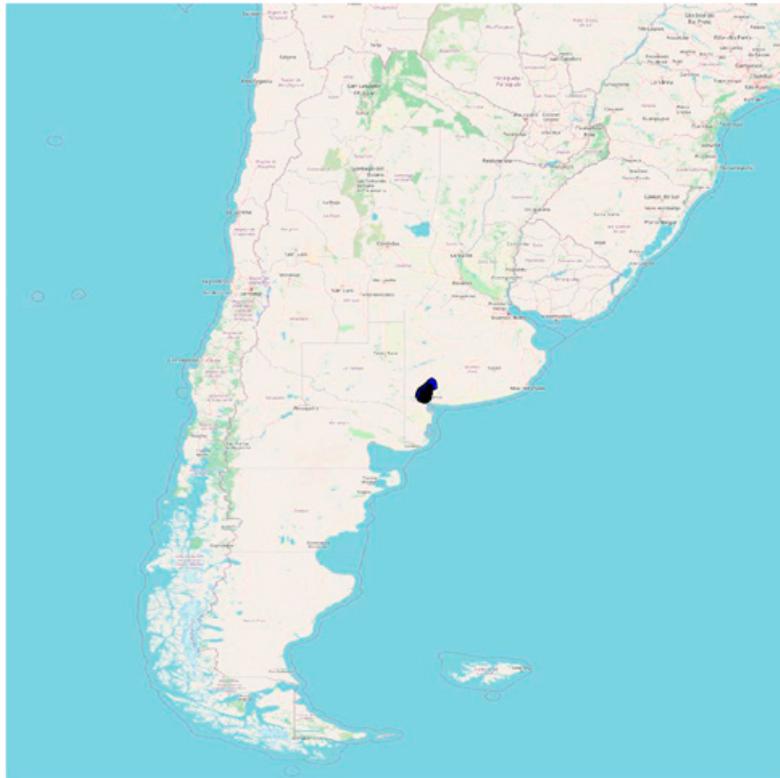
Los objetivos del presente trabajo son: i) Implementar el modelo [HEC-RAS] apoyado en [QGIS] y simular distintos escenarios de inundación considerando las estructuras existentes, para tormentas de diseño de distintas recurrencias, ii) Incluir los efectos de la marea, iii) Generar mapas de zonas inundables y iv) Definir el grado de peligrosidad de los eventos considerados en la localidad.

Herramientas de modelación 2D y SIG fueron utilizadas para desarrollar mapas de inundación en la zona de GDC, donde el escurrimiento de los arroyos Saladillo de García y Dulce se halla notoriamente afectado por la actividad antrópica (terraplenes ferroviarios, carreteros, canales artificiales, puentes, alcantarillas, etc.). Se incluyó la influencia de la altura de marea, que genera la obstrucción del drenaje de la zona.

2. Zona de estudio

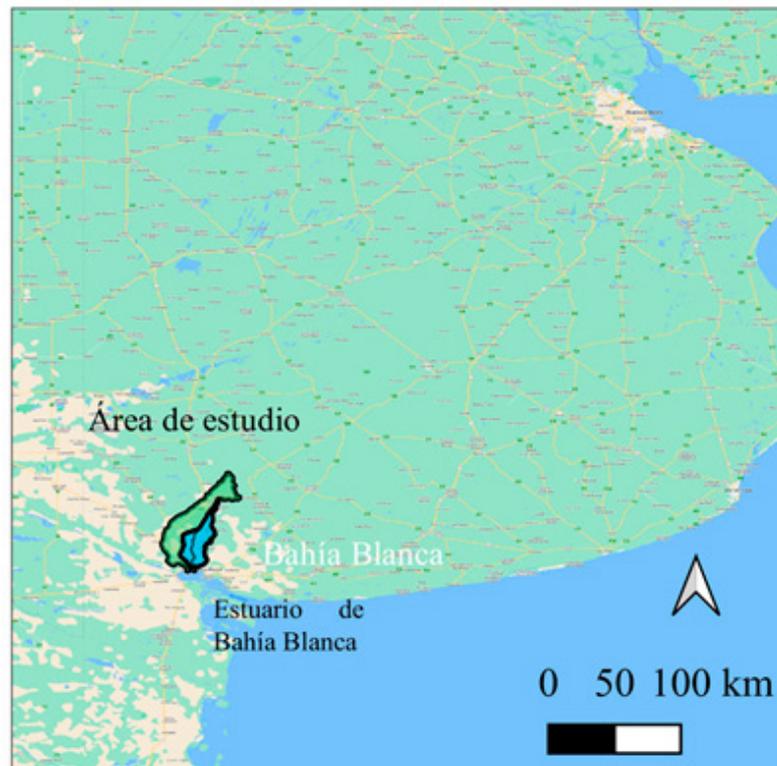
La localidad de GDC se encuentra a orillas del estuario de Bahía Blanca, en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina ([Figura 1a](#) y [1b](#)). En la cercanía del casco urbano, desemboca un canal construido con fines de riego (Canal Cuatreros), que bordea la ciudad hacia el sudoeste. El Arroyo Saladillo de García, con su principal afluente el Arroyo Dulce desemboca hacia el noreste de la localidad ([Figuras 2](#) y [3](#)). Ambos sistemas desaguan en el estuario de Bahía Blanca ([Figura 1b](#)).

Figura 1a. Ubicación de la zona de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

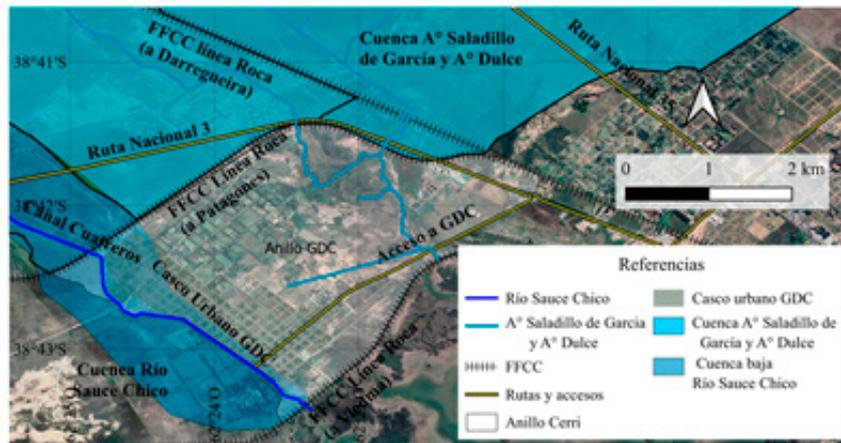
Figura 1b. Ubicación de la zona de estudio.



Elaboración propia.

La cuenca del arroyo Saladillo de García se encuentra ubicada geográficamente entre los meridianos 62° 12' O y 62° 32' O y los paralelos de 38° 09' S y 38° 43' S, cubriendo una superficie total de 834 km² y la longitud del río es de 39 km. Limita hacia el este con la cuenca del arroyo Napostá Grande y al oeste con la cuenca del río Sauce Chico ([Figura 1b](#)). La cuenca se subdivide en dos, la correspondiente al arroyo Saladillo de García propiamente dicho y la de su principal afluente el arroyo Dulce. Ambos nacen en las estribaciones del sistema de Ventania, de carácter intermitente y se desarrollan en un ambiente de llanura en el cual predominan, en general, valores bajos de pendiente ([González, 2018](#)). La cuenca baja se ha degradado debido a las actividades antropogénicas, entre ellas, el vertido de aguas servidas y los desechos de los frigoríficos ([Spagnolo, 2011](#)). La confluencia entre el Dulce y el Saladillo de García propiamente dicho se produce dentro del anillo conformado por los terraplenes ferroviarios y carreteros, que rodean a la localidad de GDC ([Figura 2](#)).

Figura 2. Anillo de GDC delimitado por terraplenes carreteros y ferroviarios.

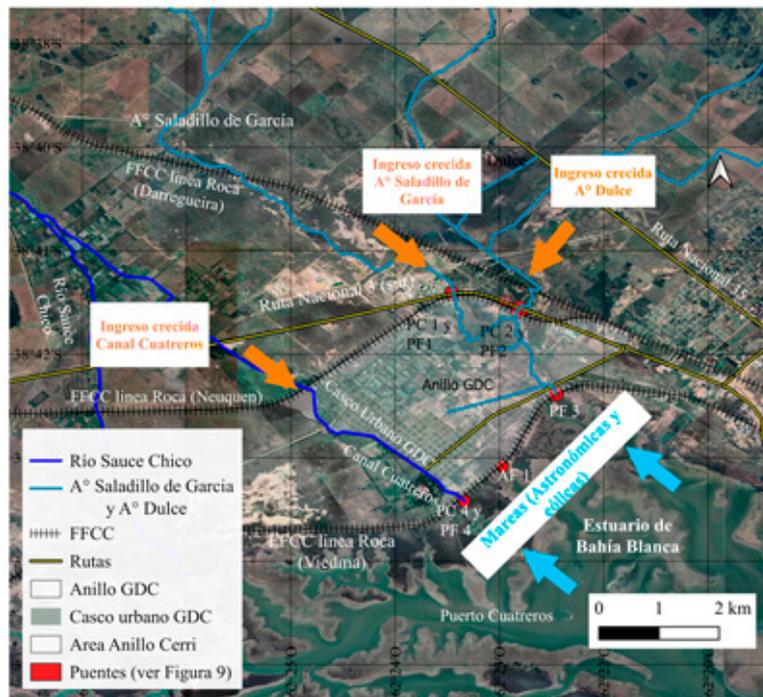


Fuente: Elaboración propia.

La cuenca del río Sauce Chico, principal curso de agua en el sector, está ubicada en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires y geográficamente se encuentra entre los paralelos 37° 51'S y 38° 44'S y meridianos 61° 59' y 62° 41' Oeste. Limita al este con la cuenca del Saladillo de García ([Figura 1b](#)). Nace en los faldeos occidentales del sistema de Ventania y desemboca en el estuario de Bahía Blanca. Posee un área de 1596 km² y la longitud del río es de 162 km. En función de las pendientes, la cuenca, se puede subdividir en alta, media y baja ([Figura 1b](#)). La parte alta corresponde a las nacientes y recibe el aporte de las sierras del sistema de Ventania. En la subdivisión media no recibe aportes substanciosos y se desarrolla en pendientes relativamente bajas. La cuenca inferior se considera que comienza en el partidor ubicado en el paraje La Horqueta, donde una porción del caudal es desviada por el Canal Cuatreros con fines de riego y pasa bordeando la localidad de GDC. El cauce natural desemboca más al sur del Estuario de Bahía Blanca ([Figura 3](#)) ([Torrero, 2009](#)). De esta manera, el Sauce Chico presenta dos desembocaduras bien diferenciadas siendo el Canal Cuatreros el que puede producir inundaciones en el casco de GDC ([Spagnolo, 2011](#)). Sin embargo, el mencionado canal, cuenta con compuertas que regulan la entrada de agua al mismo, disminuyendo e incluso evitando el peligro de inundación por esta conducción.

La [Figura 3](#) muestra las líneas férreas y carreteras que configuran un polígono alrededor del casco urbano de GDC (Anillo de GDC), con sobrelevaciones por encima del terreno natural de hasta 6 m en distintos lugares. También figuran canales artificiales que sirven de drenaje. Hacia el sudeste, los terraplenes ferroviarios impiden que las mareas eólicas extraordinarias ingresen a la ciudad. Los mismos funcionan como diques y permiten el escurrimiento solo a través de los puentes y alcantarillas ya sea ingresando o saliendo a través de estas. Ejemplo de ello resultan los puentes sobre el terraplén sudeste de la ciudad (FFCC Roca vía Viedma) que, durante las mareas eólicas extraordinarias, producen ingreso del agua del estuario anegando y dificultando el drenaje del agua dulce proveniente del continente ([Fernández et al. en Prensa](#)).

Figura 3. Amenazas de inundación en la zona del anillo de GDC y estructuras que permiten el ingreso y egreso de las crecidas y mareas.



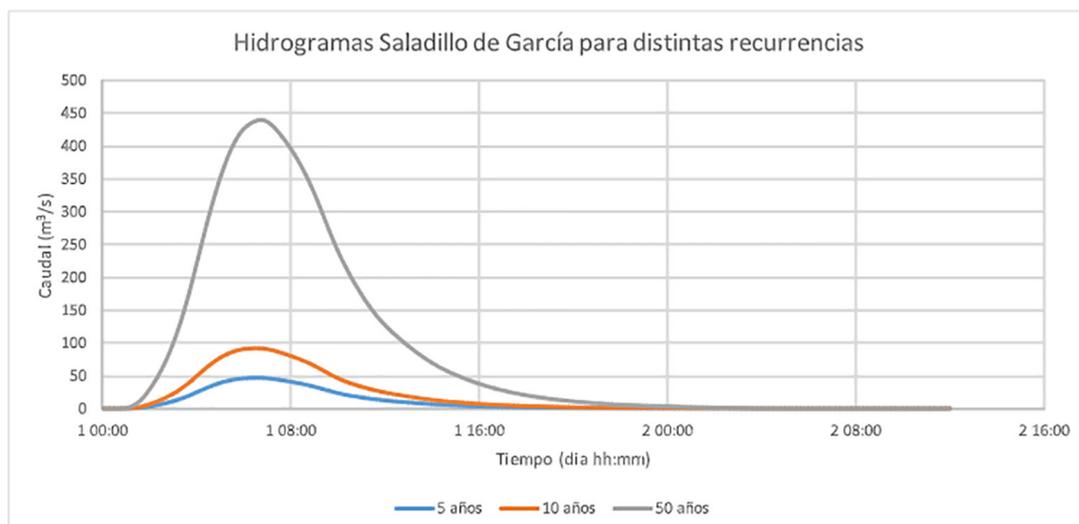
Fuente: Modificado de [Fernández et al. \(en Prensa\)](#).

3. Materiales

3.1 Hidrogramas de crecida

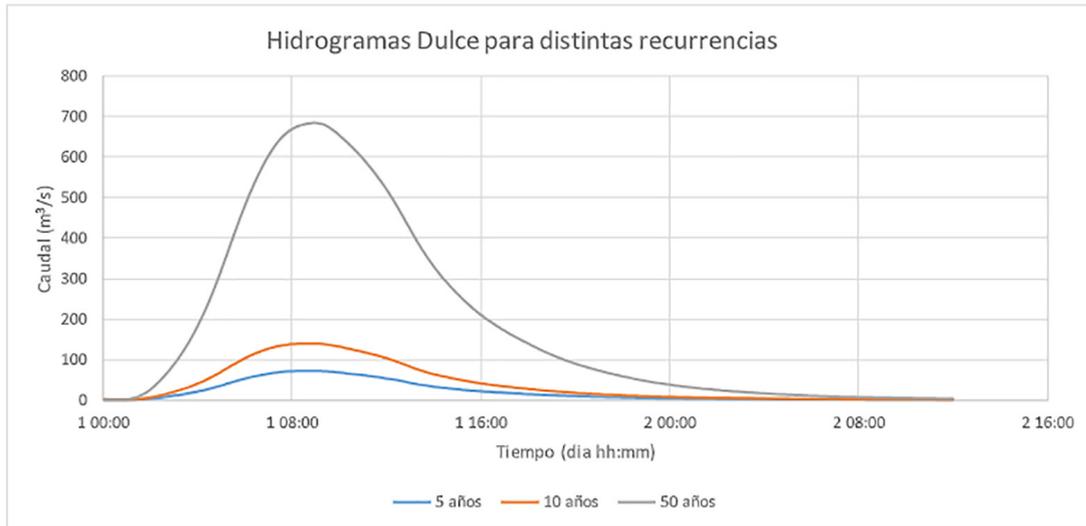
Las crecidas provenientes del Sauce Chico, Saladillo de García y Dulce, ingresan y egresan al anillo de GDC, a través de puentes y alcantarillas que se encuentran en los terraplenes tanto ferroviarios como carreteros. [Fernández et al. \(en Prensa\)](#) han determinado los hidrogramas de crecidas en base a curvas IDF ([Sequeira, 2006](#)) de la zona, para 5, 10 y 50 años de recurrencia. Estas fueron seleccionadas porque usualmente ciclos de 5 y 10 años, proporcionan caudales de diseño para diversas obras de tipo vial e hidráulicas urbanas, mientras que la de mayor recurrencia, presenta el caso más desfavorable. Los hidrogramas correspondientes al Sauce Chico no se consideraron ya que existe una compuerta sobre Canal Cuatrerros que impide el ingreso de la crecida a la zona del anillo de GDC. Las [Figuras 4 y 5](#) muestran los hidrogramas de crecida para el Saldillo de García y Dulce, que ingresan en la zona del anillo de GDC generados por [Fernández et al. \(en Prensa\)](#) y conforman las correspondientes condiciones de borde.

Figuras 4. Hidrogramas generados por [Fernández et al. \(en Prensa\)](#), a partir de curvas IDF para la cuenca del A° Saladillo de García, para la sección correspondiente a la condición de borde del Anillo de GDC



Fuente: Fernández et al. (en Prensa).

Figuras 5. Hidrogramas generados por [Fernández et al. \(en Prensa\)](#) a partir de curvas IDF para la cuenca del A° Dulce, para la sección correspondiente a la condición de borde del Anillo de GDC.

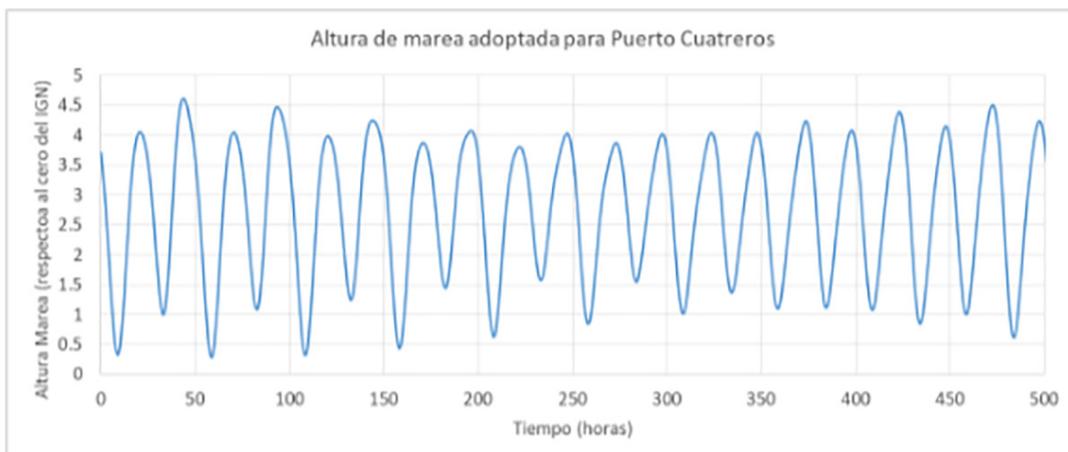


Fuente: Fernández et al. (en Prensa).

3.2 Efecto de las mareas

Para el presente trabajo se cuenta con los datos de marea de Ingeniero White, medidos por el Consorcio de Gestión del Puerto de Bahía Blanca ([CGPBB, 2023](#)), en oportunidad de la tormenta subtropical del 24 de marzo de 2022. A los efectos de la simulación se usa la serie temporal donde se repiten los ciclos de marea críticos, para superponer con el efecto de la crecida de los arroyos fue adoptado para poder evaluar la situación más desfavorable ([Figura 6](#)). [Fernández et al. \(en Prensa\)](#) realizaron un análisis estadístico de los máximos niveles alcanzados por el mar en base a una serie de tiempo de 57 años en Ingeniero White. Se determinó que la marea producida durante el 24 de marzo de 2022, posee una probabilidad de ocurrir menor al 1 %, de acuerdo con la distribución de valores extremos de Weibull. Las alturas del nivel de marea fueron chequeadas por una simulación hidrodinámica del estuario completo ([Campuzano et al., 2014](#)).

Figura 6. Serie de tiempo de Niveles de marea en Ingeniero White respecto del cero de IGN usadas para la simulación



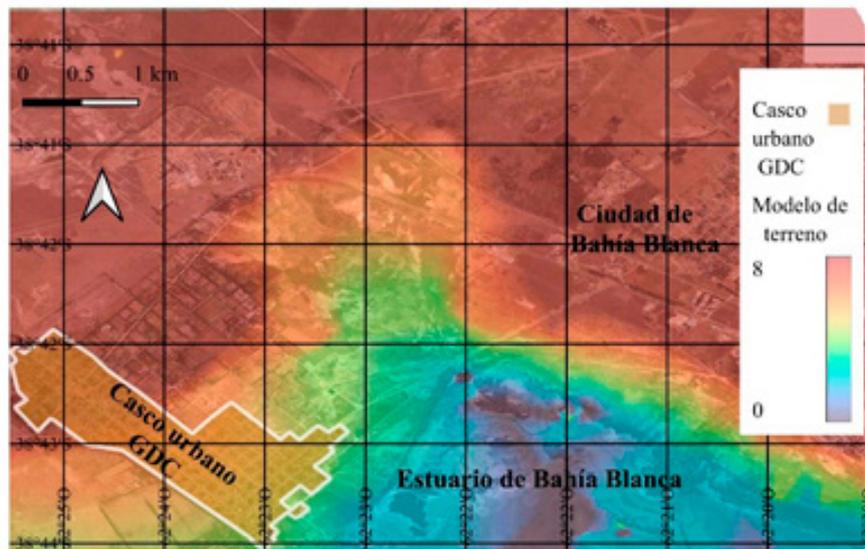
Fuente: Elaboración propia.

4. Métodos

4.1 Modelo digital de terreno

El modelo digital de terreno del área encerrada por los terraplenes (Anillo de GDC) se elaboró mediante la utilización de modelos de elevación en formato ráster [MDE] del Instituto Geográfico Nacional (Fuente: Instituto Geográfico Nacional de la República Argentina) [IGN], para una red de 30x30 m de tamaño de celda, sobre las cuales se determinaron las curvas de nivel correspondientes. Para el casco urbano de GDC, se corrigieron las curvas de nivel del MDE en base a la carta de Bahía Blanca escala 1:50000 del IGN (Fuente: IGN de la República Argentina) y mediciones de secciones in situ. Se editaron los niveles y se establecieron correcciones en base a mediciones de campo realizadas en puntos sensibles como puentes, alcantarillas, terraplenes y accesos. Seguidamente, se editaron terraplenes y canales dándoles las dimensiones correspondientes por medio de la aplicación HEC-RAS Mapper ([US Army Corps of Engineers, 2020](#)), lo que permitió agregar información detallada al modelo de terreno ([Figura 7](#)). El sistema de referencia usado es WGS 84 y el marco de Referencia POSGAR 07 (Código EPSG: 4326) para todos los mapas.

Figura 7. MDT usado en la simulación.



Fuente: Elaboración propia en base a MDE y Carta del IGN, imágenes satelitales Google Earth y mediciones propias de campo.

4.2 Coeficiente de rugosidad

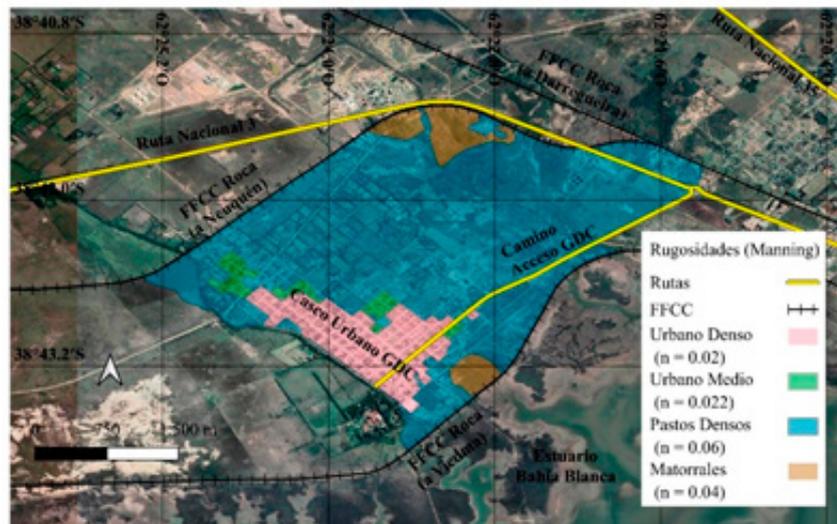
El programa HEC-RAS permite simular la rugosidad del terreno. La estimación del coeficiente de rugosidad de Manning (n), se realizó siguiendo las guías del Soil Conservation Service (SCS) ([Arcement Jr. y Schneider, 1989](#)). Este método permite estimar el coeficiente n según la Ecuación 1:

$$n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m \text{ (Ecuación 1)}$$

Donde n_b corresponde a la rugosidad básica del suelo, n_1 la rugosidad debida a las irregularidades como pozos, depresiones, montículos, etc., n_2 toma en cuenta la variación dentro de las secciones del canal (no aplicable en este caso), n_3 aplica a las obstrucciones dentro de la planicie, n_4 representa la rugosidad debida a la vegetación y m es un coeficiente de meandrosidad que se considera igual a 1.

En función de las observaciones efectuadas en el relevamiento de campo y la información obtenida por medio de imágenes satelitales, se adoptó un mapa de rugosidad del terreno asignándole valores de n a las diferentes subáreas del anillo de GDC ([Figura 8](#)).

Figura 8. Distribución del coeficiente de Manning por el método del SCS.



Fuente: Elaboración propia.

4.3 Estructuras hidráulicas

Los puentes y alcantarillas ubicados en los terraplenes que rodean al casco urbano de GDC, juegan un rol central en el escurrimiento dentro del anillo de GDC. Esto se debe a que solo a través de ellos, se produce el ingreso y egreso del agua. [Fernández et al. \(en Prensa\)](#) llevaron a cabo campañas de relevamiento de 12 puentes y alcantarillas, con sus correspondientes secciones, luces, ancho, longitud de y entre pilas de puentes si las hubiera, estribos, etc. a fin de ser implementarlos en el programa de simulación HEC-RAS. La Figura 9 muestra imágenes de los puentes y alcantarillas relevadas y su ubicación.

Figura 9. Puentes y alcantarillas que permiten el ingreso y egreso de las crecidas y mareas al anillo de GDC.



Fuente: Fernández et al. (en Prensa).

4.4 Implementación de HEC-RAS.

El programa de simulación desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers River Analysis System, ([U.S. Army Corps of Engineers, 2021](#)), fue implementado para 6 distintos escenarios de simulación ([Tabla 1](#)).

Tabla 1. Escenarios planteados para la simulación con HEC-RAS

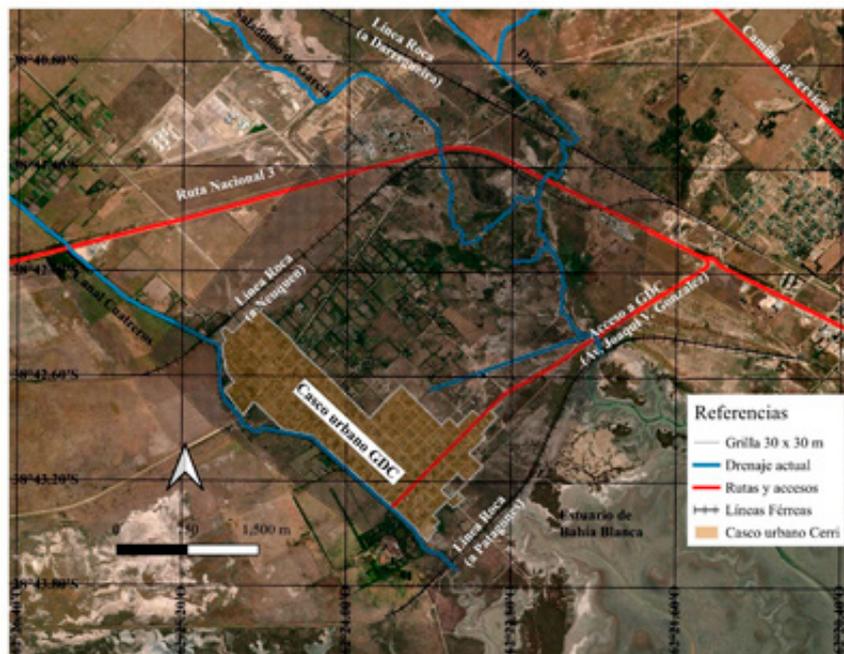
Recurrencia de la tormenta (años)	Efecto de marea
5	sin marea
	con marea
10	sin marea
	con marea
50	sin marea
	con marea

Fuente: Elaboración propia.

4.4.1 Grilla de cálculo

En base al modelo de terreno elaborado (Figura 4), se generó una grilla de cálculo de 30x30 m sobre el modelo del terreno. Las correspondientes líneas de quiebre sobre cada uno de los terraplenes, canales naturales y artificiales existentes fueron forzadas para generar la grilla de cálculo adaptada. De esta manera se logró representar el terreno y la influencia antrópica en la zona de estudio (Figura 10).

Figura 10. Grilla de cálculo para el anillo de GDC, para las condiciones planteadas



Fuente: Elaboración propia.

4.4.2 Condiciones de borde

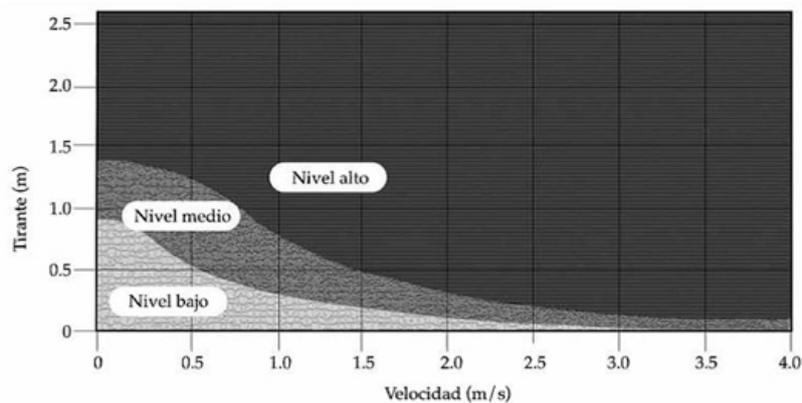
Las condiciones de borde externas al área de cálculo fueron incorporadas (Figura 4), siendo estas los hidrogramas del Saladillo de García, Dulce, y variaciones temporales de la marea generadas por Fernández et al. (en Prensa). Sobre los terraplenes se implementaron los puentes y alcantarillas utilizando información previamente relevada (Figura 5).

Las descargas de los ríos y arroyos que escurren por debajo de los puentes se ven afectadas por el nivel de marea, lo cual establece cierto grado de ahogamiento presente en la zona de estudio. Se implementó la condición de borde de descarga, correspondiente a la variación de altura de marea en el tiempo. Se adoptaron ciclos de mareas correspondientes a la tormenta del 24-25 de marzo de 2022. Estos datos correspondientes al mareógrafo de Ingeniero White, fueron chequeados por medio de simulaciones (Cam-puzano et al., 2014), las que corroboraron los valores adoptados para esta simulación (Figura 7).

4.5 Peligrosidad por inundación

La Agencia para el Manejo de Emergencias de los Estados Unidos (FEMA) desarrolló un criterio para la generación de mapas de peligro en el que relaciona el tirante máximo h (m), y la velocidad máxima v (m/s) (Figura 11). Con base a estas relaciones se establecen tres rangos de peligro: nivel bajo, medio y alto de peligrosidad (Alcocer-Yamanaka et al., 2016). Para la zona de peligrosidad alta, las vidas de las personas pueden estar en peligro y las edificaciones pueden tener daño estructural. En el caso de peligro moderado, es decir el nivel medio de peligrosidad, se presentan daños a la integridad de las personas y afectaciones a las construcciones, mientras que para el nivel bajo de peligrosidad las personas no se ven afectadas pero las edificaciones pueden sufrir daños ligeros. Para hacer un mapa de peligro de inundación es necesario conocer los parámetros mencionados, su recurrencia y efectos que puedan modificar la velocidad y la profundidad, como lo es la marea.

Figura 11. Criterio propuesto por FEMA para clasificar los grados de peligrosidad de eventos de inundaciones.



Fuente: Alcocer-Yamanaka et al. (2016)

Este criterio permite evaluar la peligrosidad de los diferentes escenarios considerados (Tabla 1), conociendo la velocidad y el tirante de inundación obtenidos directamente de las simulaciones. Por lo tanto, una vez realizadas las mismas, se conoce la distribución areal de la altura de inundación y velocidad del escurrimiento. Luego, adoptando los máximos valores de altura de inundación y velocidad para el instante de máxima inundación (Figuras 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22 y 23), la Figura 11 (FEMA) permite clasificar la peligrosidad.

5. Resultados

5.1 Escenarios

Se plantearon los siguientes escenarios para las simulaciones con HEC-RAS (Tabla 2).

Tabla 2. Esquema de representación de salidas de la simulación para la máxima inundación en la zona

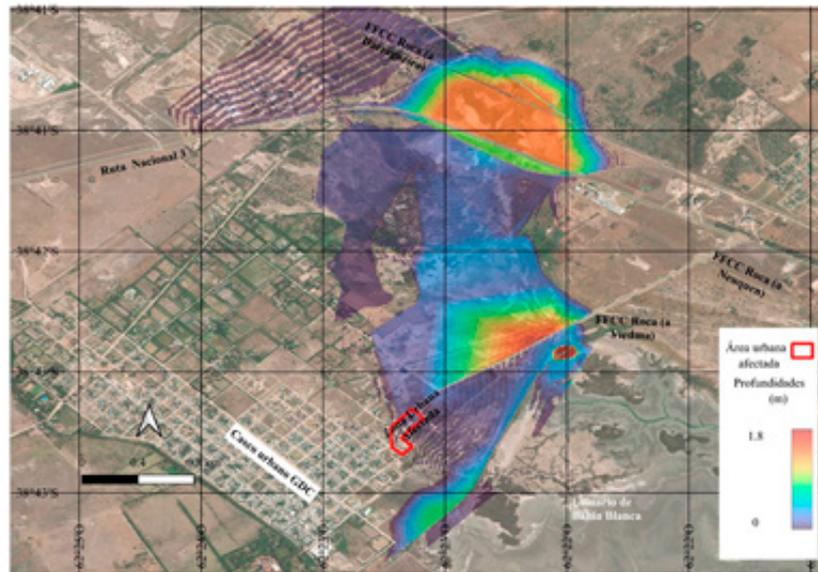
Recurrencia de la tormenta (años)	Efecto de marea	Profundidad de inundación (m)	Velocidad del flujo (m/s)
5	sin marea	Figura 12	Figura 13
	con marea	Figura 14	Figura 15
10	sin marea	Figura 16	Figura 17
	con marea	Figura 18	Figura 19
50	sin marea	Figura 20	Figura 21
	con marea	Figura 22	Figura 23

Fuente: Elaboración propia.

5.1.1 Áreas inundables para tormentas de recurrencia 5 años

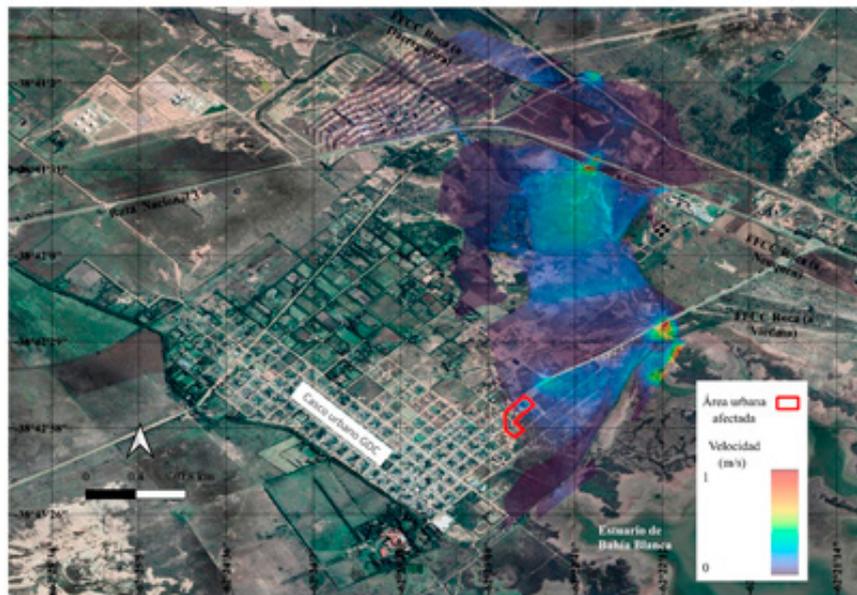
Se elaboraron mapas de inundación simulada, 17,5 horas después del inicio de la precipitación (máxima área urbana inundada) para tormentas de recurrencia de 5 años sin considerar el efecto de mareas (Figuras 12 y 13). Se destaca un polígono correspondiente al área urbana afectada donde la profundidad máxima de inundación es de 0,10 m y la velocidad máxima es de 0,12 m/s, afectando un área urbana de 0,04 km².

Figura 12. Área urbana comprometida y profundidades simuladas de inundación para tormentas de recurrencia 5 años en el anillo de GDC sin efecto de marea.



Fuente: Elaboración propia.

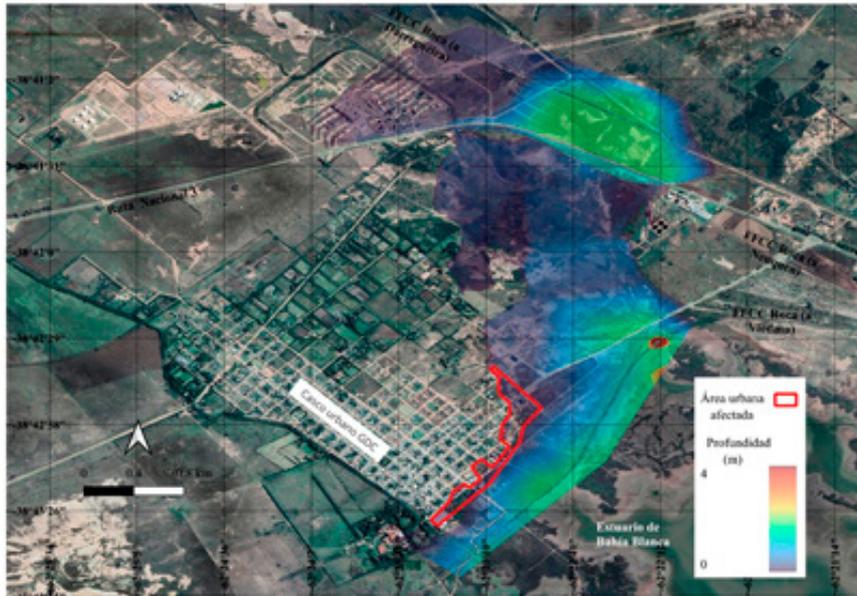
Figura 13. Área urbana comprometida y velocidades simuladas de inundación para tormentas de recurrencia 5 años en el anillo de GDC sin efecto de marea.



Fuente: Elaboración propia.

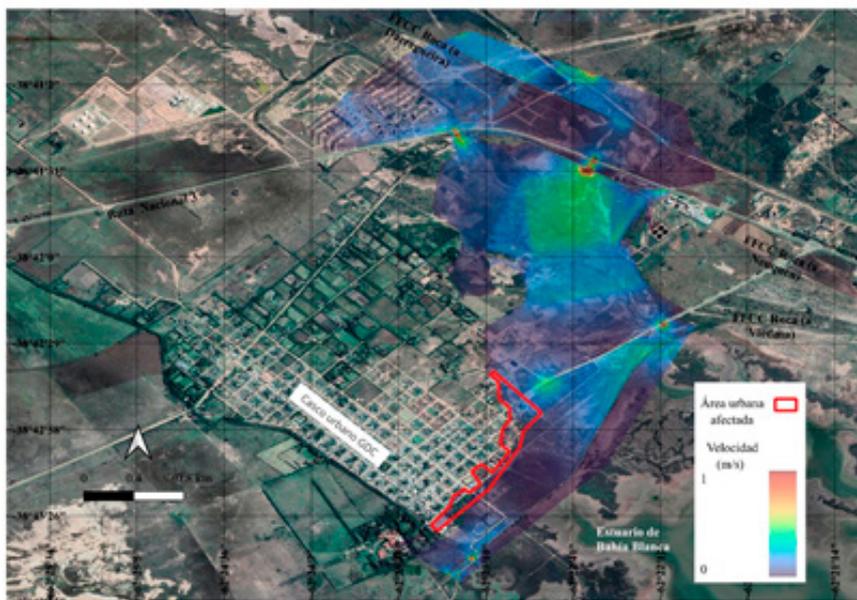
Se elaboraron mapas de inundación simulada 12,5 horas después del inicio de la precipitación (máxima área urbana inundada) para tormentas de recurrencia 10 años, incluyendo el efecto de mareas (Figuras 14 y 15). Se destaca un polígono correspondiente al área urbana afectada donde la profundidad máxima de inundación es de 0,12 m y la velocidad máxima es de 0,13 m/s, afectando un área urbana de 0,23 km².

Figura 14. Área urbana comprometida y profundidades simuladas de inundación para tormentas de recurrencia 5 años en el anillo de GDC con efecto de marea.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 15. Área urbana comprometida y velocidades simuladas de inundación para tormentas de recurrencia 5 años en el anillo de GDC con efecto de marea.

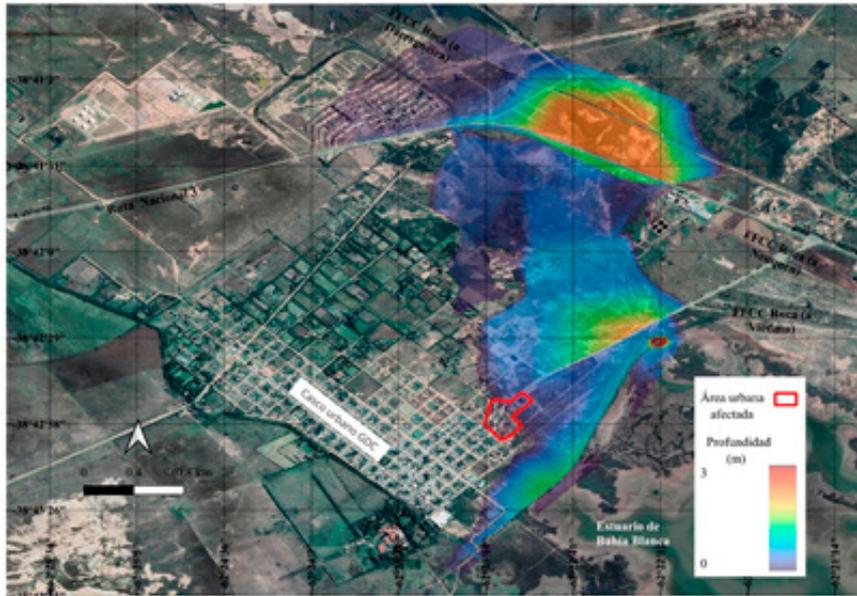


Fuente: Elaboración propia.

5.1.2 Áreas inundables para tormentas de recurrencia 10 años

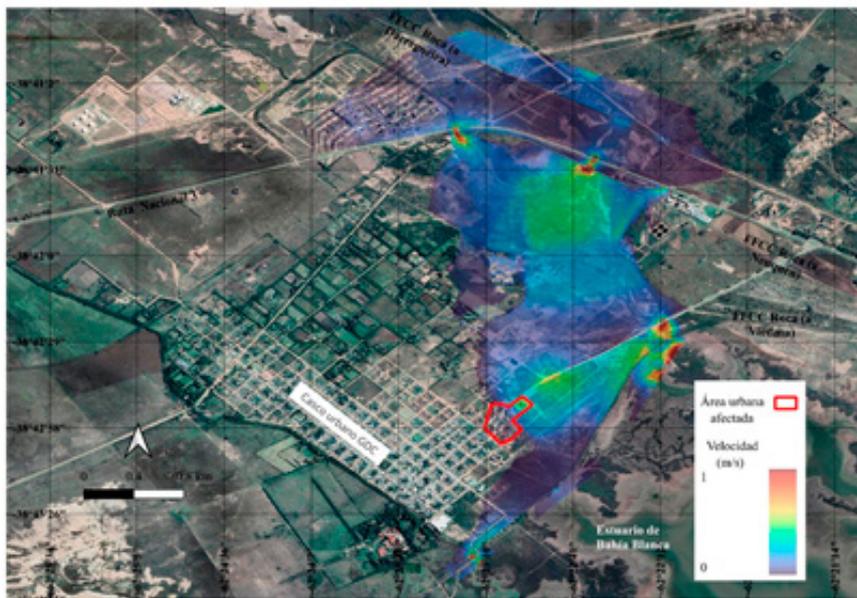
Se elaboraron mapas de inundación simulada 16,5 horas después del inicio de la precipitación (máxima área urbana inundada) para tormentas de recurrencia de 10 años, sin considerar el efecto de mareas (Figuras 16 y 17). Se destaca un polígono correspondiente al área urbana afectada donde la profundidad máxima de inundación es de 0,23 m y la velocidad máxima es de 0,54 m/s, afectando un área urbana de 0,09 km².

Figura 16. Área urbana comprometida y profundidades de inundación simuladas para tormentas de recurrencia 10 años en el anillo de GDC sin efecto de marea.



Fuente: Elaboración propia.

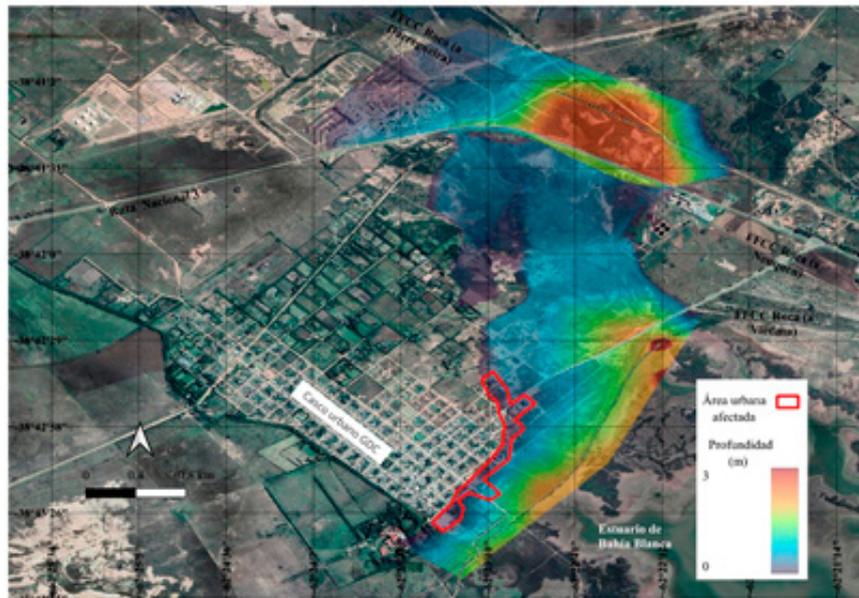
Figura 17. Área urbana comprometida y velocidades de inundación simuladas para tormentas de recurrencia 10 años en el anillo de GDC sin efecto de marea.



Fuente: Elaboración propia.

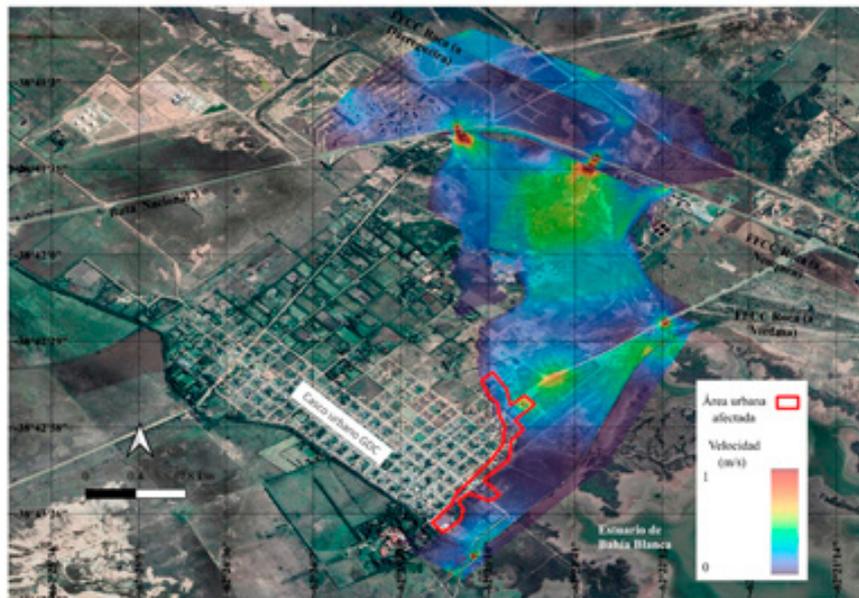
Se elaboraron mapas de inundación simulada 12,5 horas después del inicio de la precipitación (máxima área urbana inundada) para tormentas de recurrencia de 10 años, incluyendo el efecto de mareas (Figuras 18 y 19). Se destaca un polígono correspondiente al área urbana afectada donde la profundidad máxima de inundación es de 0,32 m y la velocidad máxima es de 0,60 m/s, afectando un área urbana de 0,24 km².

Figura 18. Área urbana comprometida y profundidades de inundación simuladas para tormentas de recurrencia 10 años en el anillo de GDC sin efecto de marea.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 19. Área urbana comprometida y velocidades de inundación simuladas para tormentas de recurrencia 10 años en el anillo de GDC con efecto de marea.

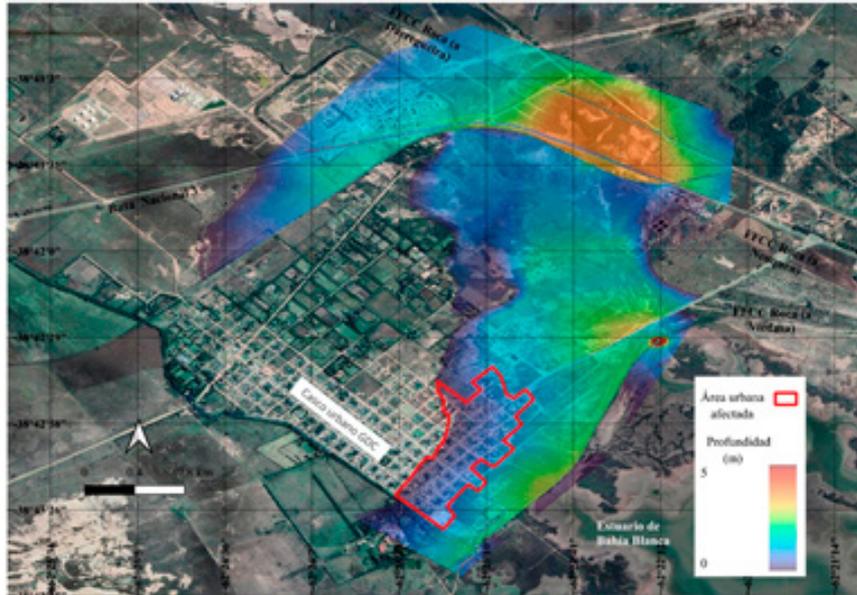


Fuente: Elaboración propia.

5.1.3 Áreas inundables para tormentas de recurrencia 50 años

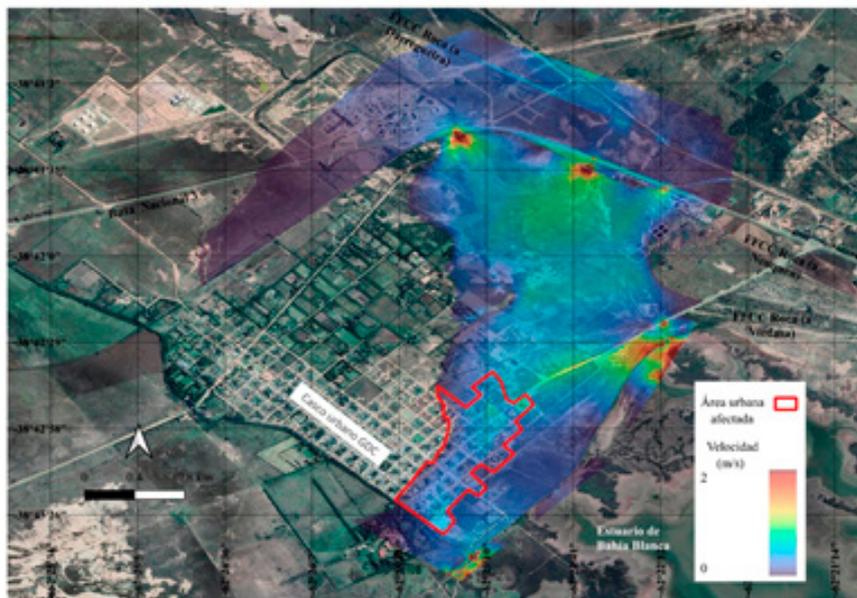
Se elaboraron mapas de inundación simulada 11,5 horas después del inicio de la precipitación (máxima área urbana inundada) para tormentas de recurrencia de 50 años, sin considerar el efecto de mareas (Figuras 20 y 21). Se destaca un polígono correspondiente al área urbana afectada donde la profundidad máxima de inundación es de 1,10 m y la velocidad máxima es de 0,74 m/s, afectando un área urbana de 0,72 km².

Figura 20. Área urbana comprometida y profundidades de inundación simuladas para tormentas de recurrencia 50 años en el anillo de GDC sin efecto de marea.



Fuente: Elaboración propia.

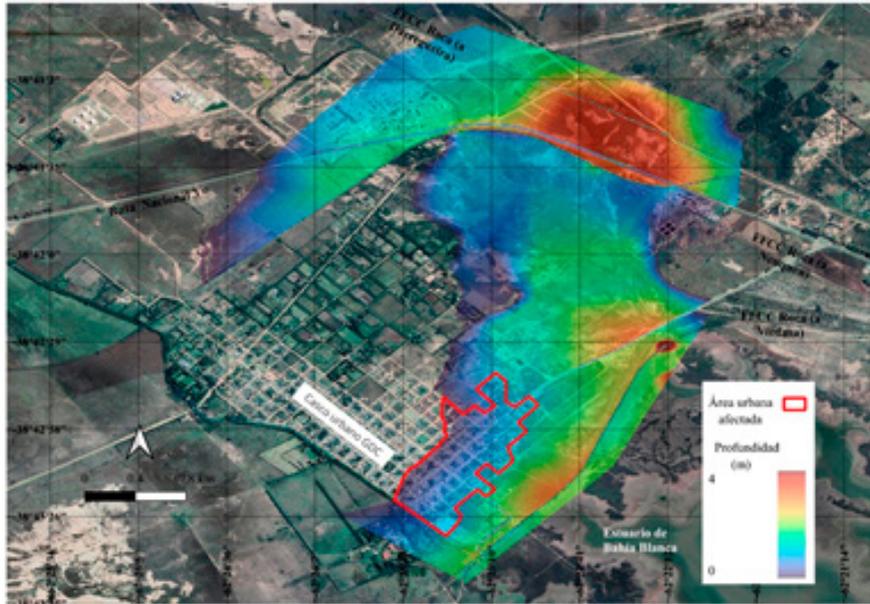
Figura 21. Área urbana comprometida y velocidades de inundación simuladas para tormentas de recurrencia 50 años en el anillo de GDC sin efecto de marea.



Fuente: Elaboración propia.

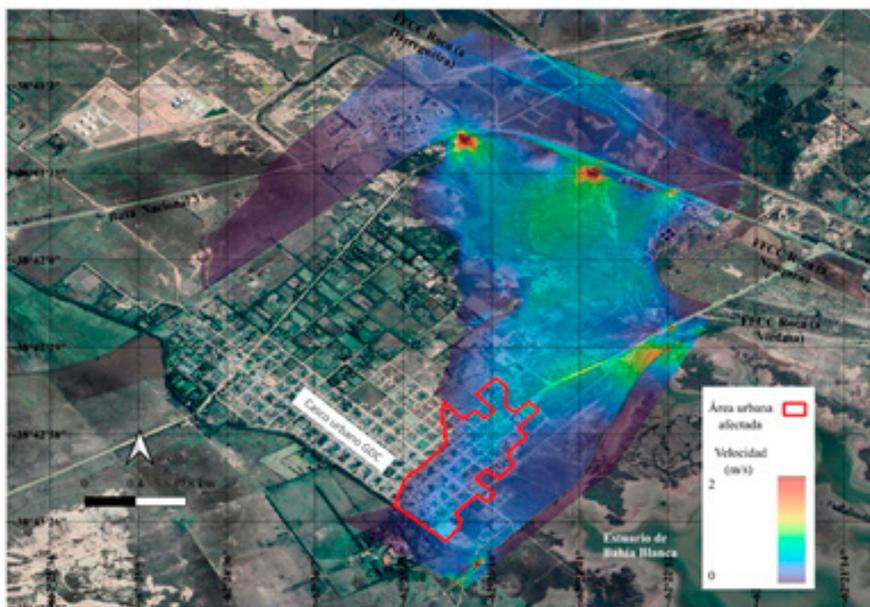
Se elaboraron mapas de inundación simulada 11,0 horas después del inicio de la precipitación (máxima área urbana inundada) para tormentas de recurrencia de 50 años, incluyendo el efecto de mareas ([Figuras 22](#) y [23](#)). Se destaca un polígono correspondiente al área urbana afectada donde la profundidad máxima de inundación es de 1,23 m y la velocidad máxima es de 0,78 m/s, afectando un área urbana de 0,77 km².

Figura 22. Área urbana comprometida y profundidades de inundación simuladas para tormentas de recurrencia 50 años en el anillo de GDC con efecto de marea.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 23. Área urbana comprometida y velocidades de inundación simuladas para tormentas de recurrencia 50 años en el anillo de GDC con efecto de marea.



Fuente: Elaboración propia.

La simulación 2D con HEC-RAS revela el funcionamiento hidráulico integral de la zona del anillo de GDC. En todos los escenarios simulados, se puede observar el efecto de endicamiento provocado por los terraplenes ferroviarios (FFCC Roca a Neuquén, FFCC Roca a Viedma) y viales (Ruta Nacional 3) (Figuras 9, 11, 13, 15, 17 y 19). Asimismo, las altas velocidades se concentran en las proximidades de los vanos de los puentes (Figuras 10, 12, 14, 16, 18 y 20). Esto implica que, hidráulicamente, el anillo de GDC provee protección contra eventos de crecidas provenientes de los arroyos Saladillo de García y Dulce, e incluso de las mareas (FFCC Roca a Patagones). Aunque el efecto de las mareas induce a su vez, una situación de ahogamiento de los desagües naturales, que retrasa el libre desagote del volumen de agua total ingresado al anillo.

5.2 Resumen de parámetros simulados y valoración de la peligrosidad según FEMA

A modo de resumen, la [Tabla 3](#) presenta los valores máximos de tirante y velocidad en cada área urbana afectada, obtenidos de las simulaciones. La última columna describe el grado de peligrosidad descrito

por FEMA, obtenido de la [Figura 11](#), en función del máximo tirante y la máxima velocidad alcanzadas en cada situación simulada.

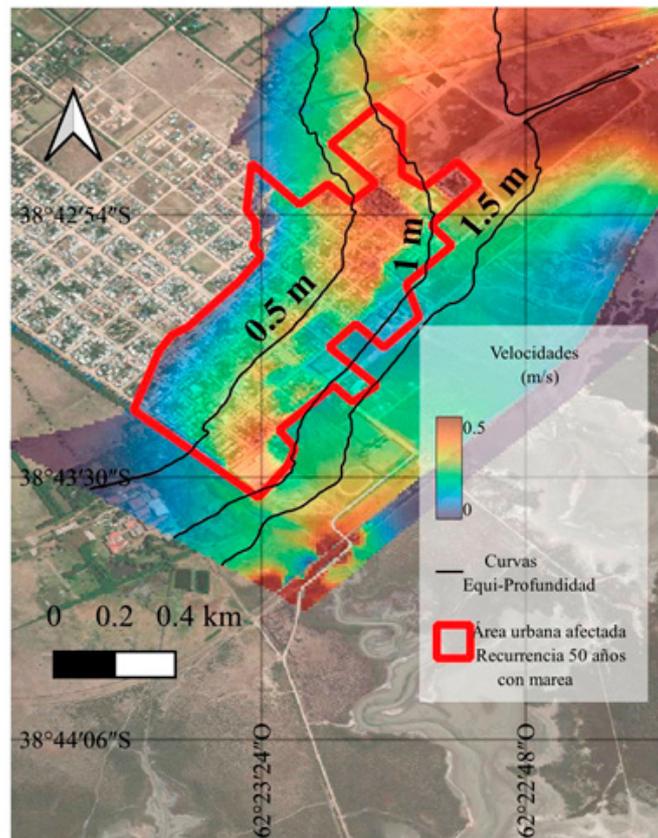
Tabla 3. Valores de parámetros característicos simulados para los escenarios propuestos.

Recurrencia de la tormenta (años)	Efecto de marea	Área urbana afectada (km ²)	Porcentaje respecto área urbana GDC (%)	Profundidad Máxima de inundación (m)	Velocidad máxima del flujo (m/s)	Valoración de la peligrosidad según FEMA (Figura 11)
5	sin marea	0,04	1,6	0,10	0,12	Bajo
5	con marea	0,23	9,2	0,12	0,13	Bajo
10	sin marea	0,09	3,6	0,23	0,54	Bajo
10	con marea	0,24	9,6	0,32	0,60	Bajo
50	sin marea	0,72	28,8	1,10	0,74	Medio (al límite de Alto)
50	con marea	0,77	30,8	1,23	0,78	Alto

Fuente: Elaboración propia.

Los valores máximos de velocidad y altura simulados para recurrencias de 10 y 5 años respectivamente, representan una peligrosidad baja según FEMA. Esto indica que las áreas afectadas señaladas en las [Figuras 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 y 19](#), se convierten en mapas de peligrosidad ya que en ningún punto de las áreas marcadas se producen condiciones que pongan en peligro la integridad de las personas y mucho menos sus vidas. Sin embargo, para la recurrencia de 50 años en parte de las áreas inundables, se presentan valores máximos de altura de agua y velocidad que pueden poner en peligro las vidas de las personas en las áreas marcadas ([Figuras 20, 21, 22 y 23](#)). La [Figura 24](#) muestra superpuestos los valores de profundidad y velocidad sobre la parte de la localidad afectada. Las curvas de igual profundidad de inundación encierran zonas de velocidades mayores a 0,5 m/s lo que indica que estas subáreas presentan peligrosidad alta según FEMA, en caso de producirse los fenómenos meteorológicos extremos simulados.

Figura 24. Detalle de la zona de inundación para tormentas de recurrencia 50 años con efecto de marea, con velocidades y profundidades de inundación.



Fuente: Elaboración propia.

Los porcentajes del área alcanzada por la inundación sin considerar el efecto de la marea, son significativamente menores a los simulados con efecto de marea. Es de esperar que, si las crecidas se producen al mismo tiempo que mareas eólicas extraordinarias, mayores áreas urbanas se verán afectadas, por lo que el efecto de las mareas juega un papel no despreciable en el fenómeno simulado. Cabe aclarar que tormentas que causan lluvias y mareas eólicas, conocidas como sudestadas, son comunes en el estuario de Bahía Blanca.

Se destaca que, para recurrencias de menos de 10 años, el peligro a que se ven sometidas las personas y bienes es bajo. Sin embargo, para eventos de recurrencias de 50 años, parte de los habitantes de GDC enfrentarán una peligrosidad media y alta en las zonas afectadas ([Figura 24](#)).

6. Discusión

Los escenarios de simulación representan tormentas con determinada recurrencia, que fueron elegidas en función de la aplicabilidad de los resultados. El caso de recurrencias de 5 y 10 años, proveen valores finales útiles para el diseño de estructuras hidráulicas coherentes con las avenidas más comunes. La recurrencia 50 años permite evaluar una situación más desfavorable y permite estimar los posibles daños a la salud e integridad de las personas, así como a los bienes materiales.

[Aldalur \(2010\)](#) analizó el efecto de anegamiento producido por las mareas, que provocan inundaciones debido a las intensas precipitaciones en Ingeniero White, a solo 13 Km de GDC. Si bien las inundaciones se producen por causas similares en ambas localidades, la geometría del terreno y la ausencia de arroyos o canales que desemboquen cerca del casco urbano de Ingeniero White, establecen una diferencia que no permite comparación con GDC.

Se lograron simular los efectos que las mareas extraordinarias junto a crecidas de los cursos de agua provocan. Es claro que la influencia del nivel del mar no es despreciable en ninguno de los tres escenarios. Se calcularon los porcentajes de áreas afectadas por inundaciones provenientes tanto de los arroyos como de las mareas eólicas combinadas, en base a recurrencias establecidas. En los casos de recurrencias de 5 y 10 años, se encontró que la peligrosidad para la porción del área de la localidad inundada es baja. Por ello los eventos que tienen recurrencias menores de 10 años no representan un problema serio para los pobladores y bienes. Sin embargo, para 50 años de recurrencia, cerca de 30% de la localidad se ve afectada y en ciertas subáreas, la peligrosidad se revela media y alta, como se muestra en la [Figura 24](#).

En un escenario de cambio climático, y ascenso del nivel medio del mar, GDC puede verse seriamente afectada. La crecida máxima simulada corresponde a 50 años de recurrencia. No se dispone de datos estadísticos que permitan generar una lluvia de proyecto mayor. Por lo tanto, la situación en GDC puede ser aún más grave que la simulada.

Para eventos de recurrencia de 50 años, la diferencia entre el área inundada con y sin marea es muy pequeña. Por lo tanto, el efecto de marea resulta despreciable, respecto de la crecida de origen pluvial para esta recurrencia. Esta misma conclusión se verifica en el río Biobío ([Alarcón Valenzuela et al., 2019](#)), donde la diferencia de área inundada para recurrencias de más de 50 años, la marea no influye. Cabe aclarar que en el mencionado estudio no se modelaron mareas eólicas extraordinarias en combinación con crecidas de alta recurrencia.

La simulación es optimizable. Se pueden mejorar los resultados a partir de un refinamiento de los datos de campo, lo que arrojaría una simulación de mayor calidad. Asimismo, no se encontraron en la bibliografía existente, datos de campo para realizar una calibración. Los resultados incrementarían su confiabilidad de lograr series de tiempo de distintos parámetros hidráulicos que permitan una calibración.

7. Conclusión

Se logró implementar el modelo HEC-RAS para la zona de estudio. Incluyó la elaboración de un MDT basado en: imágenes satelitales, imágenes formato ráster proporcionadas por el IGN, MDT de la carta topográfica del IGN y mediciones y observaciones de campo. Se agregaron al MDT estructuras antrópicas que desvían y modifican el natural escurrimiento del agua en la zona, haciendo hincapié en los puentes y alcantarillas. Se incorporó la variación areal de la rugosidad del terreno (n de Manning), se adoptaron hidrogramas de crecida para 3 diferentes recurrencias.

Las simulaciones se llevaron a cabo con la condición de borde de marea. Los valores de nivel alcanzados se implementaron como condición de borde correspondiente al estuario de Bahía Blanca. Esto permitió verificar y cuantificar el grado de ahogamiento producido por el ingreso de la marea al Anillo de GDC.

Se generaron mapas de zonas susceptibles de ser inundadas por eventos de las características simuladas, para un área máxima de inundación. Complementariamente, se presentan mapas de velocidad del escurrimiento.

En base a los resultados de profundidad y velocidades simuladas, se pudo determinar el área que el agua ocupa, profundidad y velocidad del escurrimiento, para el instante particular de mayor cobertura en la zona urbana. Los valores proporcionados por FEMA que clasifican la peligrosidad de la inundación fueron usados para determinar distintos grados de peligro.

La circulación de las crecidas simuladas, no presentan grandes áreas urbanas de inundación para recurrencias menores e iguales a 10 años. La peligrosidad estimada para estas áreas es baja. Sin embargo, la tormenta de 50 años de recurrencia, podría dejar cerca del 30% del área de la localidad bajo agua. Las zonas donde la vida humana corre peligro, se producen en subáreas incluidas en el área total de inundación. Fuera de estas subáreas, la peligrosidad es baja.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Ingeniero Civil Pablo Pascualetti, por su colaboración en la obtención de datos de marea. El presente estudio fue financiado por la Secretaría General de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional del Sur (UNS) con fondos correspondientes al proyecto de investigación "Cuenecas del sur de la región pampeana. Hidrología, calidad y modelización de los recursos hídricos. Fase III".

Referencias Bibliográficas

- Aldalur, N. B. (2010). *Inundaciones y Anegamientos en Ingeniero White. Aplicación de Tecnologías de la Información Geográfica para la Planificación y Gestión de la Hidrología Urbana* [Tesis doctoral, Departamento de Geografía y turismo de la Universidad Nacional del Sur]. <https://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/2604>
- Arcement Jr., G. J. y Schneider V. R. (1989). Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains. *United States Geological Survey*, (2339). <https://doi.org/10.3133/wsp2339>
- Alarcón Valenzuela, S., Caamaño Avendaño, G. y Villagrán Valenzuela, M. (Diciembre de 2019). Caracterización de las Inundaciones Fluviales del sector Bellavista, Comuna Tomé. *Simposio de Habilitación Profesional*, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Sagrada Concepción, Chile. http://repositoriodigital.ucsc.cl/bitstream/handle/25022009/3306/Tesis_Sebastian_Alarcon.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Alcocer-Yamanaka, V. H., Rodríguez-Varela, J. M., Bourguett-Ortiz, V. J., Llaguno-Guilberto, O. J. y Albornoz-Góngora, P. M. (2016). Metodología para la generación de mapas de riesgo por inundación en zonas urbanas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(5), 33-55. <http://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/1269>
- Campuzano, F. J., Pierini, J. O., Leitão, P. C., Gómez, E. A. y Neves, R. J. (2014). Characterization of the Bahía Blanca estuary by data analysis and numerical modelling. *Journal of Marine Sciences Systems*, 129, 415-424. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2013.09.001>
- Collazos, G., Villanueva, I., Briceño, N., Cazenave, G., Guevara, C. y Blanco M. (2018). Modelo Bidimensional de inundación urbana de la ciudad de Azul (Argentina) con herramientas de uso libre. *XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Buenos Aires, Argentina. <https://host170.sedici.unlp.edu.ar/server/api/core/bitstreams/ae6db3bd-3067-4e22-9ab0-36e3db420847/content>
- Consortio de Gestión del Puerto de Bahía Blanca. (2023). *Datos históricos de niveles de marea en Ingeniero White, Puerto Galván y Puerto Belgrano*. <https://puertobahiablanca.com/vts-online.html>
- Fernández, S. N., Pérez, D. E., Flores, M. A., Abalo, P. O. (En prensa). Análisis de los factores de peligrosidad ante eventos de inundación de la ciudad de General Daniel Cerri (Buenos Aires, Argentina). *Revista Universitaria de Geografía*, 32(2).
- González, M. A. (2018). *Hidogeomorfología de la cuenca del arroyo del Saladillo de García aplicado al ordenamiento del periurbano de Bahía Blanca* [Tesis de Licenciatura. Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur]. <https://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/5773>.

- La Macchia, M. L. y Linares, S. (2021). Impacto de la evolución de la superficie urbana edificada en el escurrimiento superficial de la ciudad de Tandil, Buenos Aires, Argentina: un escenario de simulación con HEC-RAS. *Boletín de Estudios Geográficos*, (115), 65-99. <https://doi.org/10.48162/rev.40.003>
- Mattos Gutierrez, S. R., Parodi, G. N. y Damiano, F. (2013). *Análisis de amenaza por inundación en área urbana empleando modelos hidrodinámicos y herramientas SIG* (Pergamino, Argentina). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). <https://es.scribd.com/doc/166512808/Analisis-de-amenaza-por-inundacion-en-area-urbana-empleando-modelos-hidrodinamicos-y-herramientas-SIG>.
- Reyna, T., Reyna, S., Lábaque, M., Riha, C. y Fulginiti, F. (Septiembre de 2018). Plan de Drenaje Urbano, Ciudad de Arroyito. *XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Buenos Aires, Argentina. https://www.ina.gob.ar/congreso_hidraulica/resumenes/LADHI_2018_RE_41.pdf.
- Sequeira, M. (2006). Determinación de la relación entre la intensidad, la duración y la frecuencia de las precipitaciones en Bahía Blanca. *Actas de las IV Jornadas Interdisciplinarias del Sudoeste Bonaerense*, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.
- Spagnolo, S. (2011). Gestión Ambiental del Desarrollo Urbano. Estudio de caso: localidad de General Daniel Cerri. *Huellas*, (15), 180-197.
- Torrero, M. P. (2009). *Río Sauce Chico: Estudio Hidrográfico para un desarrollo sustentable* [Tesis Doctoral, Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur]. <https://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/1978>
- U.S. Army Corps of Engineers. (2021). *HEC-RAS 2D User's Manual*. US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/r2dum/6.2/introduction/hec-ras-2d-modeling-advantages-capabilities>
- U.S. Army Corps of Engineers. (2020). *HEC-RAS Mapper User's Manual*. US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rmum/6.2/introduction>