

Modelización hidrodinámica bidimensional y riesgo de inundaciones en la cuenca urbana de la ciudad de Tandil, Buenos Aires, Argentina

Two-dimensional hydrodynamic modeling and risk of flooding in the urban basin of the city of Tandil, Buenos Aires, Argentina

María Lorena La Macchia¹

Recibido 4 de septiembre de 2024; aceptado 14 de noviembre de 2024

RESUMEN

El estudio y dinámica del espacio urbano conlleva a pensar en procesos que acontecen en el territorio y generan impactos en la configuración y desarrollo de las ciudades. Estos procesos, cuyas interrelaciones constituyen la estructura de un sistema que funciona como una totalidad organizada, redefinen la dialéctica sociedad-naturaleza de un sistema complejo. La gestión del riesgo constituye una ecuación entre los conceptos de amenaza y vulnerabilidad que implica el análisis de las distintas dimensiones de los fenómenos. La metodología propuesta pretende ser una guía para entender el riesgo en las ciudades medias para la gestión de inundaciones en cuencas urbanas. Ello supone la consideración del conjunto de elementos que intervienen en la configuración y dinámica del territorio. Cada proceso define un subsistema dentro de la totalidad determinado por el subsistema natural, el político institucional, el económico y el social delineado por sus propias dimensiones y variables. Este trabajo tiene como objetivo construir un modelo hidrológico bidimensional para generar escenarios de escurrimiento y drenaje superficial dentro de la cuenca urbana de la ciudad de Tandil detectando áreas inundadas y anegadas durante y después del transcurso de un evento hidrometeorológico. El mismo será definido a

¹ Centro de Investigaciones Geográficas (CIG), Instituto de Geografía, Historia y Ciencias Sociales (IGEHCs) CONICET-UNCPBA, Argentina, correo electrónico: llamacchia@fch.unicen.edu.ar.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2153-7353>

partir de un Modelo Digital de Elevación (DEM), donde la topografía del terreno tendrá sus propios parámetros para la simulación del proceso de escorrentía superficial teniendo en cuenta variables hidrológicas, físicas y urbanas. Se analizó el área inundada para el año 2011 extrayendo el producto de mapas de velocidad y profundidad del anegamiento superficial para identificar áreas de afectación real y potencial mediante la correlación de variables físicas y urbanas, la identificación de patrones de distribución espacial de la superficie inundada y la cuantificación del peligro a partir de la determinación de una escala técnica, utilizada por el Instituto de Resiliencia ante Desastres de Australia (AEMI).

Palabras clave: *simulación, escurrimiento superficial, peligro, vulnerabilidad, TIG.*

ABSTRACT

The study and dynamics of urban space leads to thinking about processes that occur in the territory and generate impacts on the configuration and development of cities. These processes, whose interrelations constitute the structure of a system that functions as an organized whole, redefine the society-nature dialectic of a complex system. Risk management constitutes an equation between the concepts of threat and vulnerability that implies the analysis of the different dimensions of the phenomena. The proposed methodology aims to be a guide to understand the risk in medium-sized cities for the management of floods in urban basins. This involves considering the set of elements that intervene in the configuration and dynamics of the territory. Each process defines a subsystem within the whole determined by the natural subsystem, the political-institutional, the economic and the social delineated by its own dimensions and variables. The objective of this work is to build a two-dimensional hydrological model to generate runoff and surface drainage scenarios within the urban basin of the city of Tandil, detecting flooded and inundated areas during and after a hydrometeorological event. The model will be defined from a Digital Elevation Model (DEM), where the topography of the terrain will have its own parameters for simulating the surface runoff process, taking into account hydrological, physical and urban variables. The area flooded in 2011 was analyzed by extracting the product of the velocity and depth maps of surface flooding to identify the areas of real and potential impact by correlating physical and urban variables, identifying the spatial distribution patterns of the flooded area and quantifying the hazard based on the determination of a technical scale used by the Australian Institute for Disaster Resilience (AEMI).

Key words: *Simulation, surface runoff, danger, vulnerability, TIG.*

1. Introducción

El estudio y dinámica del espacio urbano conlleva a pensar en procesos que acontecen en el territorio y generan impactos en la configuración y desarrollo de las ciudades. Estos procesos, cuyas interrelaciones constituyen la estructura de un sistema que funciona como una totalidad organizada, redefinen la dialéctica sociedad-naturaleza de un sistema complejo.

La complejidad, en términos de Rolando García (2006), está asociada con la imposibilidad de considerar aspectos sectoriales y particulares de un fenómeno o proceso a partir de una disciplina específica. Por eso hablamos de una realidad compleja, en la cual, sus elementos (subsistemas) no son separables y no pueden ser estudiados aisladamente (García, 2011, p. 67).

La gestión del riesgo constituye una ecuación entre los conceptos de amenaza y vulnerabilidad (Natenzon, 1998; Herzer *et al.*, 2002; Maldonado, 2013; Carballo & Goldberg, 2014) que implica el análisis de las distintas dimensiones de los fenómenos.

Si se define el subsistema social a partir del proceso de urbanización y expansión urbana de las ciudades; el subsistema político institucional vinculado al socioeconómico, dado por el ordenamiento, la planificación en regularización de usos del suelo, las actividades productivas y el desarrollo de infraestructura; y el subsistema natural entendiendo los procesos físicos que se materializan en el territorio como la topografía, la pendiente, el drenaje y las variables propias del ciclo hidrológico, entenderíamos que esas interrelaciones entre los subsistemas generan respuestas del ambiente y el ecosistema urbano afectando la capacidad de carga del territorio.

Ferrando (2006) desarrolla una diferenciación entre anegamientos e inundaciones a partir del estudio de la recurrencia de las crecidas e indica:

Ello está asociado, por una parte, a las características del régimen pluviométrico y térmico que registre el clima imperante y, por otra, a las características morfométricas que está presente (alturas, forma, pendiente media, superficie, etc.), al desarrollo del sistema de drenaje (densidad, frecuencia y jerarquía de la red hídrica), y a la capacidad de retención hídrica de la cuenca, aspectos todos ellos que influyen en la torrencialidad, la velocidad de respuesta, el tiempo de concentración y el volumen de los caudales (Ferrando, 2006, p. 26).

Pereyra (2014) destaca que los anegamientos derivan de cambios en la permeabilidad, en la saturación del suelo y en la topografía de la superficie, ya sean por causas naturales o artificiales, cuando se acumula agua de lluvia sobre el terreno generando un desbalance entre el volumen de la lluvia precipitada en un determinado lapso de tiempo y la capacidad de evacuación de un suelo dado, tanto horizontal como verticalmente. En cambio, las inundaciones corresponden a una consecuencia derivada de otros procesos de recurrencia interanual, como son las crecidas de los cursos de agua, sumado a condiciones de insuficiencia de los sistemas de evacuación, sean estos cauces naturales, sistemas de drenaje artificializados, colectores urbanos, etc. Es por ello que es importante analizar en este subsistema la alternancia de ciclos secos y húmedos

y sus análisis estacionales y anuales para comprender como se comportan los regímenes pluviométricos y térmicos dentro de la región.

Este trabajo tiene como objetivo construir un modelo hidrológico integrado en modelos bidimensionales para simular el escurrimiento superficial de la cuenca urbana de la ciudad de Tandil detectando áreas inundables y anegadas durante y después del transcurso de un evento extremo ocurrido en mayo de 2017. Para ello, trabajos precedentes en La Macchia (2015) y La Macchia y Linares (2021) se analizan y desarrollan los procedimientos y ponen en juego la aplicación de técnicas de análisis de superficie requeridas para este modelado basado en variables e indicadores físicos y urbanos.

El resultado será poder generar un modelo hidrodinámico de escurrimiento mediante la combinación de las herramientas QGIS¹ y Hec-RAS.² Se analizarán los mapas de velocidad y profundidad del anegamiento superficial para el año 2011. Las lluvias a simular partirán de eventos reales. Se variarán los escenarios mediante la modificación de los parámetros de intensidad, duración y frecuencia de los eventos para identificar áreas de afectación real y potencial. Estos resultados permitirán cuantificar el riesgo a partir de la determinación de una escala técnica, utilizada por el Instituto de Resiliencia ante desastres de Australia (AEMI) que define umbrales de peligro en base al producto de mapas de velocidades y profundidades. Posteriormente se presentarán los escenarios postprocesamiento mediante un álgebra de capas en el Sistema de Información Geográfica ArcGIS® según las dimensiones y variables de análisis.

La resiliencia y capacidad de adaptación de los ecosistemas a la amenaza y peligrosidad junto a la vulnerabilidad y la exposición sobre distintas dimensiones y variables permitirá obtener una visión integral del riesgo para pensar en la construcción y el desarrollo de ciudades sostenibles.

2. Área de estudio

El área de estudio de este trabajo se ubica en la ciudad de Tandil situada al SE de la provincia de Buenos Aires y la cuenca urbana del arroyo Langueyú que atraviesa la circunscripción I del partido como muestra la Figura 1. Esta cuenca está integrada por dos subcuencas que cubren casi la totalidad del área urbana de la ciudad. Las condiciones de emplazamiento han condicionado la configuración territorial y dinámica intraurbana desde su etapa fundacional. Las sierras de Tandilia, un basamento cristalino precámbrico de más de 2200 millones de años (Cingolani, 2008), han constituido un límite natural de expansión convertido hoy en un instrumento de valorización y especulación. A lo largo de su historia la localidad ha sufrido eventos hidrometeorológicos de gran magnitud e intensidad que provocaron inundaciones y anegamientos determinando el desarrollo de medidas estructurales. Los antecedentes de la inundación de 1951 que afectaron a gran parte del área urbana y suburbana de la ciudad, derivaron en la construcción del Dique del Fuerte en el año 1958. El regulador de crecidas fue

¹ Versión 3.34.7.

² Versión 5.0.3.

inaugurado en 1962 conformando el Lago del Fuerte. Los eventos extremos del año 1980 garantizaron la factibilidad de su funcionamiento. Entre las décadas de 1970 y 1980, se llevaron adelante los entubamientos de los A° Blanco y Del Fuerte, ambos colectores que dan origen al A° Languetú. Si bien las dos obras hidráulicas contribuyeron a paliar los impactos generados por la intensidad y duración de las precipitaciones, permitiendo que la población se asiente sobre ellos; el gran crecimiento urbano posterior, la demanda de infraestructura y la falta de políticas públicas que garanticen el buen funcionamiento de los pluviales conllevaron a una disminución de la capacidad de retención, captación y drenaje natural del escurrimiento superficial. Asimismo la planificación de usos de suelo residencial y no residencial, la disminución de espacios verdes, de superficies de infiltración y el desarrollo de actividades productivas resultado de la especulación inmobiliaria y el turismo constituyen elementos dentro del sistema que explican la detección de zonas inundables y anegamientos aguas arriba y aguas abajo de la ciudad.

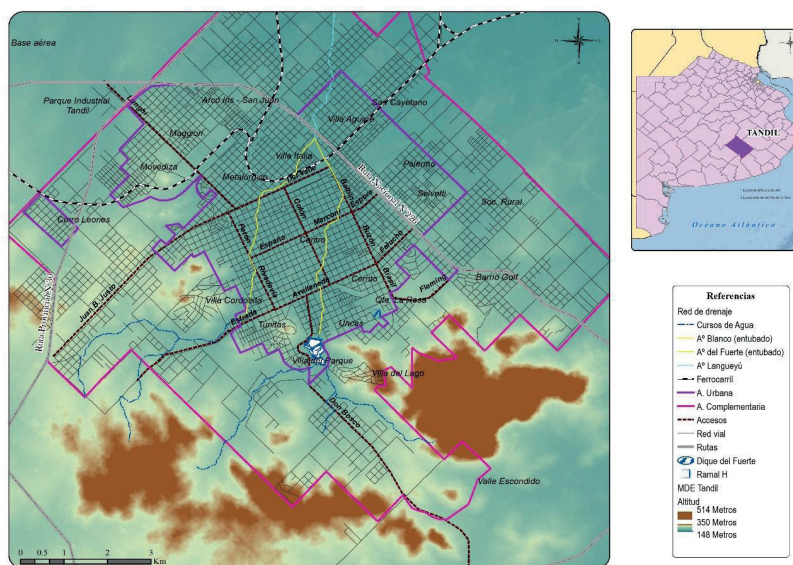


Figura 1. Localización de la ciudad de Tandil y su red de drenaje.

Fuente: elaboración propia. ArcGIS 10.2.

La lógica financiera promovida por agentes que producen y consumen el espacio sin un acompañamiento de políticas de planificación y ordenamiento territorial adecuadas impacta en la dialéctica sociedad-naturaleza transformando el subsistema natural en un medio dominado por la técnica y la tecnología. Conceptos clave como el de justicia espacial, equidad, capacidad de carga y valoración ecosistémica del paisaje urbano se encuentran sujetos a intereses y actores que definen políticas públicas en pos de costos ambientales como la densificación urbana no planificada, urbanización en áreas de protección natural

o paisajística y reducción de áreas verdes que impactan decisivamente en la alteración del sistema hidrológico e hidráulico modificando el drenaje superficial y subsuperficial y derivando en la construcción de obras de infraestructura, rellenos, canalizaciones y entubados no proyectados.

3. Dimensiones de análisis y variables explicativas

Para entender el riesgo en la cuenca urbana objeto de estudio fue necesario diagramar un esquema analítico que haga énfasis en las dimensiones y variables que permitan construir un modelo hidrológico bidimensional y se ingresen dentro del modelizador de crecidas HEC-RAS HEC (2021a, 2021b). El primer *input* fue definido a partir de un DEM SRTM3 de 12,5 m, donde la topografía del terreno tuvo sus propios parámetros para la simulación del proceso de escorrentía superficial teniendo en cuenta variables hidrológicas, físicas y urbanas (La Macchia y Linares, 2021). Las lluvias para simular partieron de eventos reales ocurridos en mayo del año 2017. Estos resultados permitieron cuantificar el riesgo a partir de la determinación de una escala técnica, utilizada por el Instituto de Resiliencia ante desastres de Australia (AEMI) que define umbrales de peligro en base al producto de mapas de velocidades y profundidades.

A continuación, se presenta el modelo de datos o esquema analítico en la Figura 2 para el modelado hidrológico según las dimensiones y variables que explican la detección de zonas anegadas e inundables dentro del área urbana y complementaria de la ciudad.

Se parte de una problemática que es pertinente poder estudiarla desde su complejidad integrando cada uno de los subsistemas en conflicto y el enfoque desde el paradigma del riesgo delineando y asociando cada una de sus dimensiones. En un primer momento se identifica el sistema físico como parte de la amenaza integrada por algunos de sus indicadores como origen, área de afectación potencial, intensidad y probabilidad de ocurrencia dentro y en áreas cercanas al lugar bajo estudio. El sistema social se enmarca en la ecuación de vulnerabilidad identificando los aspectos territoriales, sociales, económicos, culturales e institucionales que condicionan la posibilidad de daño frente a la concreción de una amenaza (González *et al.*, 2015). Por último podemos agregar el sistema jurídico institucional definido a partir de la resiliencia de las comunidades, es decir, la capacidad de adaptación y respuesta que engloba el desarrollo de políticas públicas, planes de acción, mitigación y gestión territorial afines de disminuir la incertidumbre.

“Aunque es usual encontrar el uso del término resiliencia para hacer referencia a un componente de la vulnerabilidad, ello es impreciso, ya que esta se refiere fundamentalmente a la tolerancia que tienen las configuraciones territoriales de soportar una acción perturbadora antes de presentar un cambio sustancial en sus características, en tanto que la capacidad de adaptación hace referencia a la

³ Corresponde a una versión remuestreada del modelo ALOS PALSAR DEM de 30 m. Disponible en: <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/#>

posibilidad que tienen los ecosistemas de ajustarse a variaciones sustanciales en su entorno y frente a acciones perturbadoras, súbitas o no, de manera que puedan seguir funcionando a pesar de cambios cualitativos o cuantitativos importantes” (Vera Rodríguez y Albarracín Calderón, 2017, p.113).

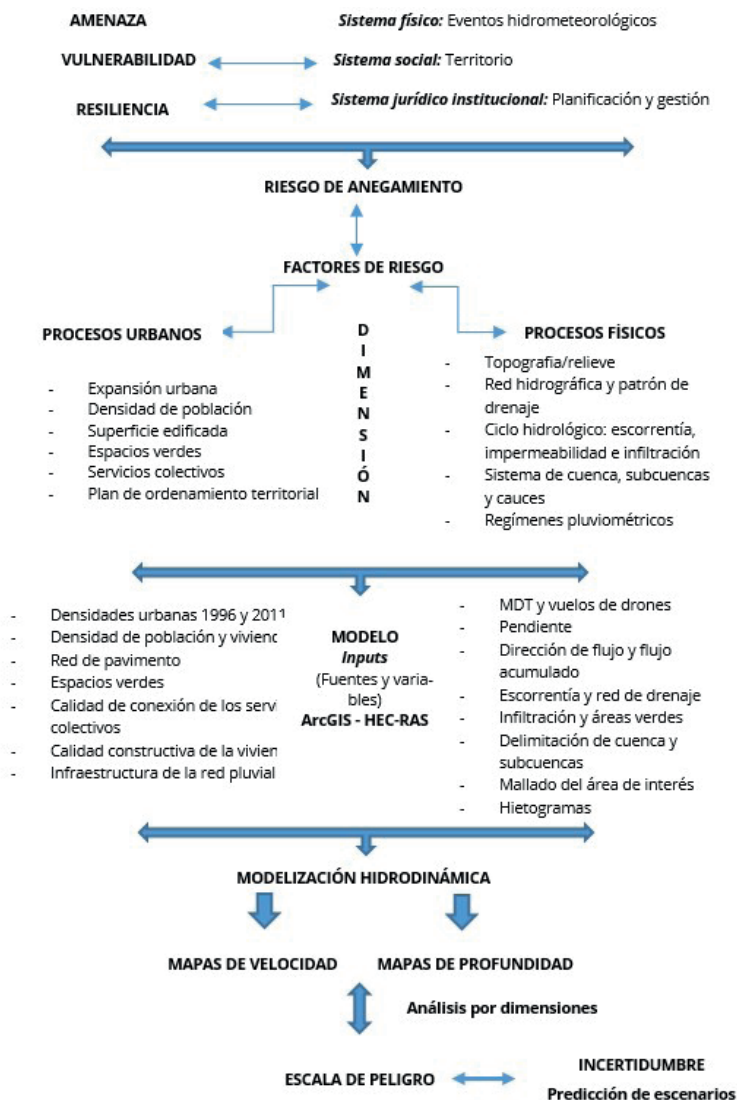


Figura 2. Esquema analítico para la elaboración del modelado hidrológico.

Fuente: elaboración propia.

En un segundo momento se especifican los factores de riesgo en áreas urbanas dividiéndolos en dos tipos: los procesos urbanos y los procesos físicos como puede apreciarse en el esquema analítico. Dentro de los primeros nos referimos al crecimiento urbano y los ejes de expansión urbana, el aumento de la densidad de población (Linares y Picone, 2018) y la superficie edificada para 1991, 2002 y 2011 y el foco puesto a la distribución espacial de los espacios verdes, la calidad de los equipamientos colectivos y el análisis de la legislación vigente teniendo en cuenta el código de zonificación del Plan de Desarrollo Territorial (PDT) de la ciudad de Tandil. Como factores físicos se considera el uso de los DEM, el aporte de las tecnologías de precisión (vuelos de drones), la delimitación de cuencas y subcuencas, el comportamiento de la red de infraestructura pluvial y su función dentro de la red de drenaje, algunas variables que derivan del ciclo hidrológico como la impermeabilidad e infiltración y la importancia de los registros pluviométricos para modelar eventos hidrometeorológicos.

En un tercer momento se ubica la transformación de los procesos tanto urbanos como físicos en fuentes, variables e indicadores del modelo analítico. Desde el aporte de las geotecnologías, la herramienta ArcGIS permite preprocesar y procesar los *inputs* del modelo hidrológico-hidráulico para luego integrarlos al entorno de HEC-RAS como modelizador de crecidas. Aquí se simularán los escenarios del modelo hidrodinámico y se extraerán mapas de velocidad y profundidad que podrán ser analizados e interpretados a partir de cada una de las dimensiones y factores de riesgo mediante el álgebra de capas, operaciones de intersección/superposición con el área inundada obteniendo patrones de distribución espacial según indicadores.

El posprocesamiento y álgebra de capas se analizará dentro del *software* ArcGIS donde la detección de zonas anegadas e inundables definirá una escala de menor a mayor grado de peligro mediante la guía AEMI (2013) propuesta por el Instituto de Resiliencia ante Desastres de Australia. En definitiva, la interpretación de los resultados obtenidos según el análisis por dimensiones y la predicción de escenarios futuros evaluarán medidas de gestión y planificación territorial con el objetivo de reducir la incertidumbre.

El diagrama presentado permite delinear las bases de estudio para la gestión de inundaciones recurrentes a escala local y frente a investigaciones precedentes (La Macchia, 2015) se intenta aproximarnos a la realidad a partir de la elaboración de un modelo bidimensional ajustado en base de variables urbanas y parámetros hidrológicos. Los escenarios de anegamiento resultantes en el área urbana y complementaria requirió profundizar en el comportamiento de algunas zonas, que denominaremos zonas testigo, por presentar particularidades en el análisis de algunos indicadores y variables como la topografía y pendiente, la expansión de la superficie edificada y la red de pavimento, la red de drenaje, la distribución de espacios verdes, la calidad constructiva de las viviendas y/o la conexión de los servicios colectivos y las variables derivadas del proceso de escorrentía superficial.

La modelización y predicción de escenarios futuros permitirán explicar qué parámetros hidrológicos y urbanos pesan más en la simulación y definen los

factores de riesgo en cada zona. La identificación del origen, el área de afectación potencial, la intensidad, duración, temporalidad y probabilidad de ocurrencia de peligro en áreas cercanas son algunas de ellas.

4. Resultados

a) Análisis de correlación/asociación y discusión del modelo hidrológico según variables físicas (topografía y pendiente) y urbanas (evolución de la superficie edificada, áreas verdes, red de infraestructura pluvial y pavimento)

El mapeo de los resultados del modelo hidrológico para los momentos analizados se enfocó en la clasificación de clases de menor a mayor profundidad y velocidad para poder generar el producto de ambos para el año 2011 y analizar cada variable considerada en el esquema analítico del modelado de datos. El impacto de los procesos urbanos en correlación con las características topográficas y la pendiente del terreno variarán la velocidad de la escorrentía y, por lo tanto, la concentración de agua sobre los principales ejes viales en las zonas urbanas.

En esta sección se intentó integrar un análisis que mida el grado de correlación y/o asociación entre cada par de variables que definieron el modelo de datos. Teniendo en cuenta que la superficie inundada del área de mallado es de 633.331 m², es decir, unas 63.3 ha aproximadamente, se elaboraron seis mapas de intersección por cada una de las variables que integran los factores de riesgo y sus dimensiones.

Las Figuras 3a, 3b, 3c, 3d, 3e y 3f están definidas por la representación cartográfica del área inundada vinculando las variables correspondientes a la topografía, la pendiente, las densidades urbanas, los espacios verdes, la red de infraestructura pluvial y la red de pavimento. El primer paso para este análisis fue transformar cada ráster en vector y obtener cada una de las intersecciones para evaluar la distribución y concentración de los píxeles inundados.

Posteriormente se crearon clases para cada variable de manera tal que podamos calcular su superficie en m² y así establecer un patrón explicativo dentro de la distribución espacial del área inundada.

Para la variable topografía se asignaron 5 categorías que involucran altitudes desde los 185 m, 250 m, 300 m, 350 m y 406 m. Para la pendiente medida en % se clasificaron cinco clases de menor a mayor pendiente: 0-5,82%, 5,83-11,6%, 11,7-17,9%, 18-26,4% y de 26,5-61,8%. Para las variables urbanas, la evolución de la superficie edificada conservó sus cuatro clases: sin edificaciones, densidad baja, densidad media y densidad alta; para la variable espacios verdes se construyeron tres buffers (*Multiple Ring Buffer*) de distancia localizados a 100 m, 200 m y 300 m. De la misma manera se procedió para la red de infraestructura pluvial estableciendo cinco buffers de distancia a 30 m, 60 m, 90 m, 120 m y 150 m. Por último en la red de pavimento se discriminaron los ejes de calles pavimentadas (SI) y las no pavimentadas (NO).

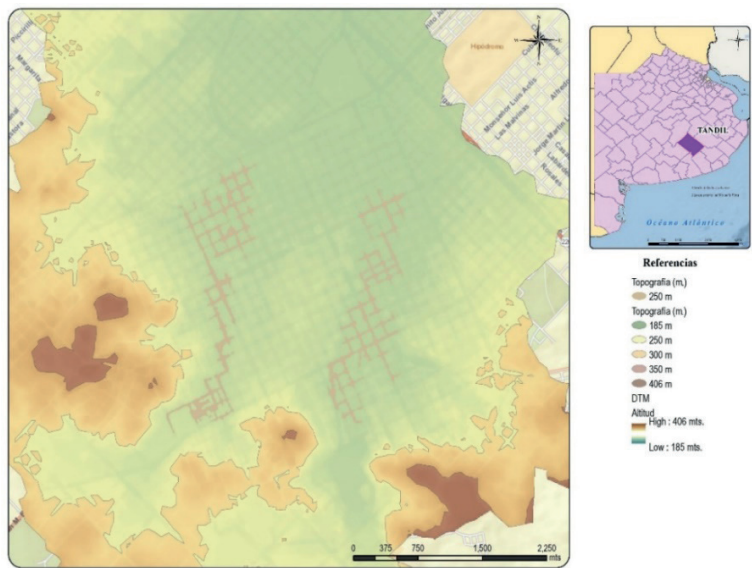


Figura 3a. Intersección de la superficie inundada con la variable topografía.
Fuente: elaboración propia a partir del DEM SRTM.

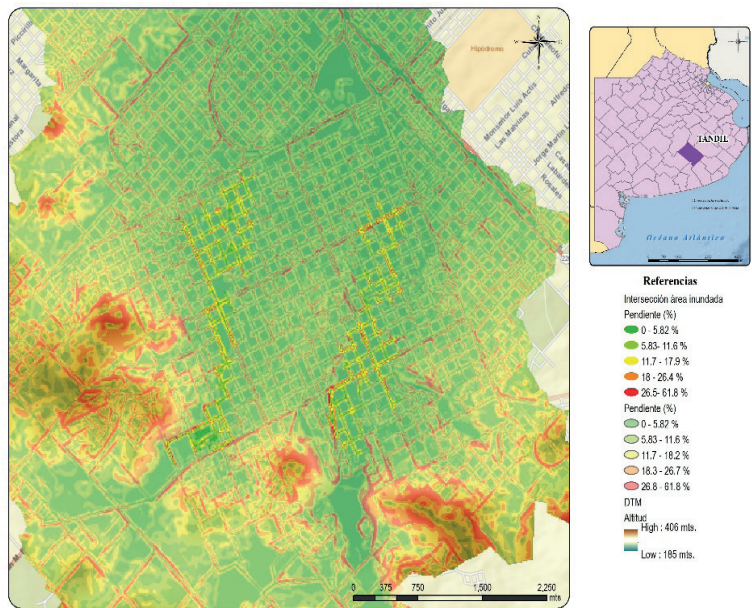


Figura 3b. Intersección de la superficie inundada con la variable pendiente.
Fuente: elaboración propia a partir del DEM SRTM.

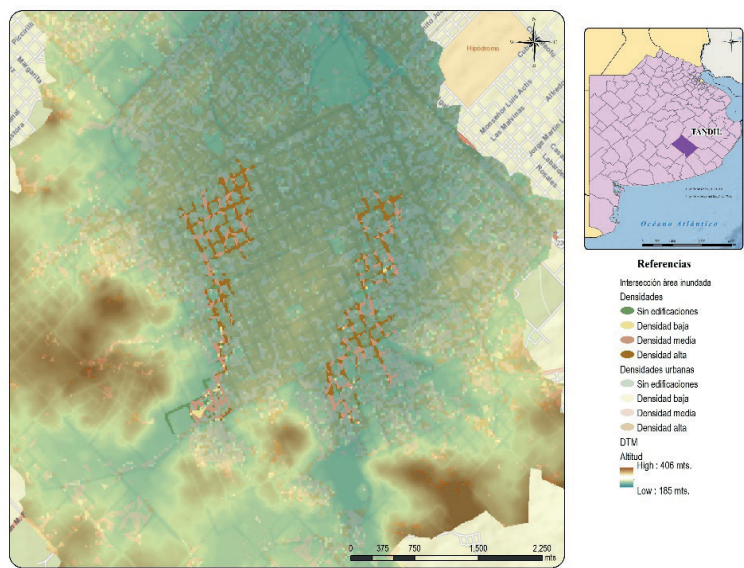


Figura 3c. Intersección de la superficie inundada con la variable densidad urbana.
Fuente: elaboración propia a partir de la clasificación supervisada de imagen Landsat 5 TM para la ciudad de Tandil, 2011.

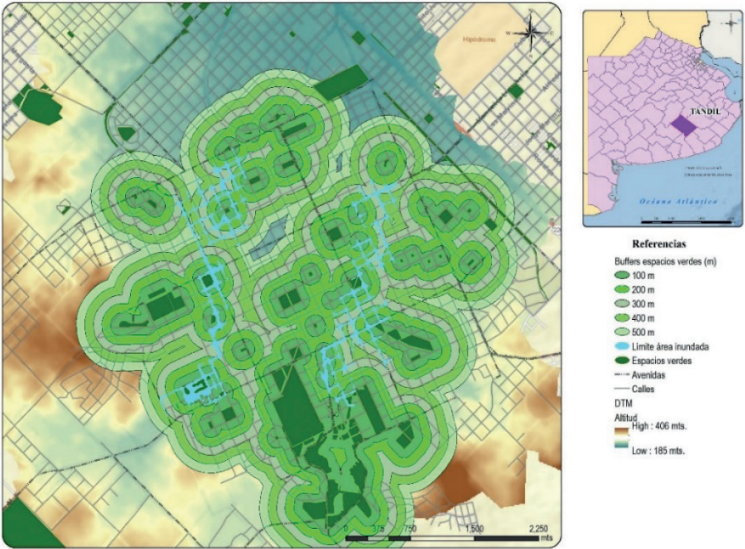


Figura 3d. Intersección de la superficie inundada con la variable espacios verdes.
Fuente: elaboración propia a partir de la IDE Tandil.

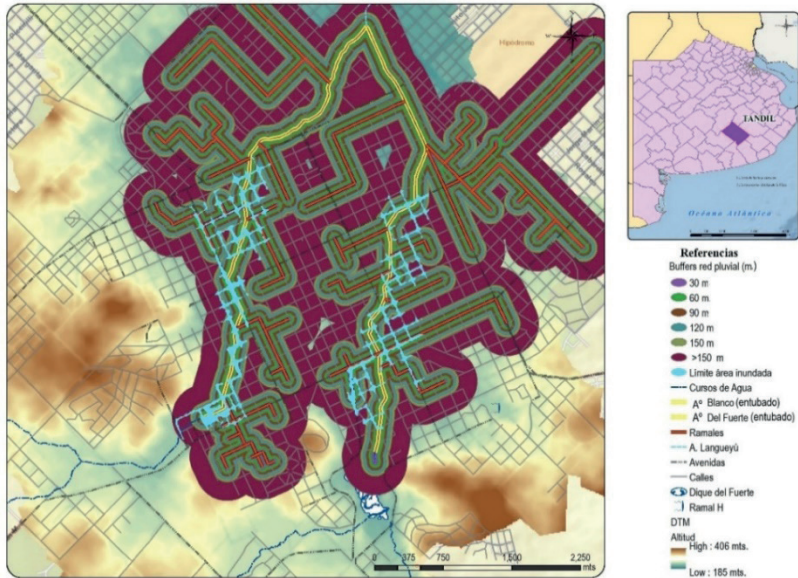


Figura 3e. Intersección de la superficie inundada con la variable red pluvial.
Fuente: elaboración propia a partir de la Dirección de Hidráulica.

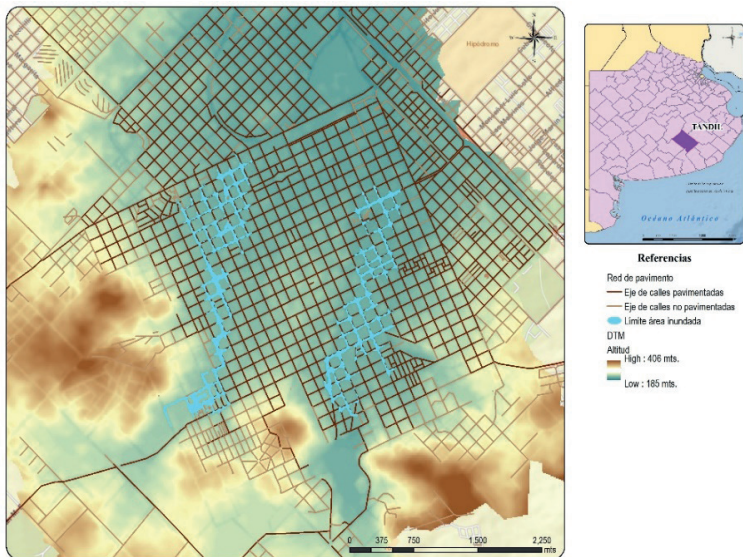


Figura 3f. Intersección de la superficie inundada con la variable pavimento.
Fuente: elaboración propia a partir de la IDE Tandil.

La Tabla 1 expresa los valores de superficie en m² para cada una de las clases creadas mediante los mapas de intersección. Es necesario destacar que los insumos utilizados para la ejecución de los cálculos fueron datos espaciales transformados para la elaboración del modelo e integrados dentro del HEC-RAS.

La distribución de la superficie edificada concentra casi la mitad del área inundada en densidades altas (28,9 ha) y densidades medias (26 ha), por lo que explica la disminución de la infiltración de 1996 a 2011 y la obstrucción que genera el recorrido del agua sobre el terreno. Si asociamos esta variable con la red de pavimento podemos afirmar que un 84% del área se ubica sobre ejes de calles pavimentadas, mientras que un 16% se localiza sobre calles de tierra.

Tabla 1. Asociación de variables físicas y urbanas en el área simulada 2011

<i>Topografía</i> <i>Área inundada</i>	<i>Sup/ha</i> <i>Sup/m²</i>
185 m	-
250 m	633.331/63,3
300 m	-
350 m	-
406 m	-
<i>Pendiente</i> <i>Área inundada</i>	<i>Sup/ha</i> <i>Sup/m²</i>
0-5,82%	140.744 /14
5,83-11,6%	248.597/24.8
11,7-17,9%	194.915/19.4
18-26.4%	46.986 /4.6
26,5-61,8%	2089/0.2
<i>Densidades urbanas</i> <i>Área inundada</i>	<i>Sup/ha</i> <i>Sup/m²</i>
Sin edificaciones	59.199/5,9
Densidad baja	24.630/2,4
Densidad media	260.466/26
Densidad alta	289.035/28,9

Continuación Tabla 1

<i>Espacios verdes Área inundada</i>	<i>Sup./ha Sup/m²</i>
100 m	235.480/23,5
200 m	190.396/19
300 m	146.359/14,6
400 m	52.710/5,2
500 m	8385/0,8
<i>Red de pluvial Área inundada</i>	<i>Sup./ha Sup/m²</i>
30 m	222.724/22,2
60 m	120.096/12
90 m	87.313/8,7
120 m	70.875/7
150 m	81.032/8,1
> 150 m	51.291/5,1
<i>Red de pavimento Área inundada</i>	<i>NO SI</i>
Eje de calles pavimentadas	295
Eje de calles no pavimentadas	56

Fuente: elaboración propia a partir de los mapas de intersección de variables físicas y urbanas.

El análisis permite inferir que el área inundada posee una altitud media que se ubica en su totalidad sobre los 250 m. La mayor parte del terreno en el área de interés (24,8 ha) posee una pendiente del 5,83-11,6% y en el intervalo del 11,7-17,9% corresponden a 19,4 ha aproximadamente, ocupando superficies menores las pendientes entre 0-5,82% (14 ha) y las ubicadas entre 18-26,4% (4,6 ha). Ello explica el mayor tiempo de retención de agua sobre el área en los primeros intervalos.

Las áreas de influencia para los espacios verdes distribuidos sobre el área simulada permitieron constatar que la mayoría de ellos se localizan entre los 100 m (23,5 ha), 200 m (19 ha) y 300 m (14,6 ha). Si bien es la distancia correcta sobre la que se debe intensificar la creación de nueva infraestructura verde para favorecer la infiltración y desacelerar la velocidad de escurrimiento, el problema deriva de la escasa existencia de ellos, ya que es muy difícil que puedan ser suficientes para disminuir las consecuencias post evento aguas arriba y aguas abajo para todo el casco urbano. Complementando con el funcionamiento de la red pluvial, las superficies parecen tener un comportamiento más uniforme

respecto a las distancias de conexión al entubamiento. El área simulada se localiza principalmente a una distancia entre 30 m (22,2 ha), 60 m (12 ha) y 90 m (8,7 ha) de un conducto o ramal. Esta conclusión nos permite pensar en la capacidad de carga y descarga de los pluviales para hacer frente a distintas intensidades en presencia de un evento. Finalmente, la asociación entre variables físicas y urbanas para el escenario simulado permite establecer un patrón de distribución espacial del anegamiento que disminuye hacia la periferia y se incrementa hacia el centro de la ciudad.

b) Análisis del riesgo: peligro y vulnerabilidad según la escala técnica australiana (AEMI 2013)

A partir de los productos cartográficos obtenidos fue posible definir un mapa de áreas de peligro a inundaciones, las cuales resultan de suma utilidad práctica para la toma de decisiones territoriales y se construyen a partir de una combinación de la profundidad por la velocidad (AIDR, 2014 y AEMI, 2013). En este sentido, el peligro es mayor a medida que aumenta la profundidad y la velocidad, complejizándose la situación por la combinación entre ambas variables. Se realizó una adaptación del método elaborado por el Instituto Australiano de Resiliencia ante Desastres partiendo de una operación de multiplicación entre las capas de profundidad y velocidad, cuyo ráster resultante permitió definir seis rangos con niveles de peligrosidad creciente que se establecieron de la siguiente manera: nulo, bajo, medio-bajo, medio, medio-alto y alto.

La Tabla 2 conforma la nueva escala técnica del esquema de interpretación de la guía AEMI 2013 donde; H1 y H2 se mantienen definiendo un nivel de peligro nulo y bajo; H3 y H4 se simplificaron a H3 con un nivel de peligro medio-bajo; H4 integra valores entre 1 y 3 de peligro medio, mientras que H5 ubica valores entre 3 y 4 con un nivel medio-alto y, finalmente, H6 se mantiene considerando los valores más elevados de peligro.

Tabla 2. Adaptación de la escala de peligro AEMI 2013

Clasificación del peligro y vulnerabilidad	Límite de clasificación (D y V) (m ² /s)	Límites de profundidad (D) (m)	Límites de velocidad (V) (m/s)
H1: Nulo	$D \cdot V \leq 0.3$	0.3	2.0
H2: Bajo	$D \cdot V \leq 0.6$	0.5	2.0
H3: Medio-bajo	$D \cdot V \leq 1.0$	1.2	2.0
H4: Medio	$D \cdot V \leq 3.0$	2.0	2.0
H5: Medio-alto	$D \cdot V \leq 4.0$	4.0	4.0
H6: Alto	$D \cdot V > 4.0$	-	-

Fuente: elaboración propia a partir de la guía AEMI 2013.

La Figura 4 permite identificar seis áreas según niveles de peligro mediante un indicador sintético como sustento para generar estrategias de prevención y medidas de gestión urbanísticas ante la probabilidad de eventos extremos.

En el área simulada se analizaron los tres últimos niveles de peligro medio, medio-alto y alto para calcular los impactos en la superficie aproximada de las principales zonas del PDT. Los barrios consolidados (BC), barrios a densificar (BD) y los subcentros en corredor (SC) son las zonas del plan más comprometidas.

Para este escenario en estas áreas se debería evaluar el tipo de uso y si sus indicadores cumplen con la normativa. Las políticas de control y prevención ante eventos impredecibles, tanto intensivas como extensivas en cada tramo de la cuenca, deberían integrarse dentro de la planificación urbana mitigando los impactos que genera el riesgo.

Si establecemos una asociación de las zonas del plan de ordenamiento con la evolución de las densidades urbanas, el cuarto nivel de peligro (H4) es el que más impacta dentro del área simulada con densidades urbanas medias y altas. Finalmente es necesario evaluar las viviendas afectadas haciendo énfasis en la calidad de los equipamientos colectivos. Según el esquema analítico, los servicios se midieron según la calidad de conexión, calidad de los materiales y calidad constructiva de las viviendas.

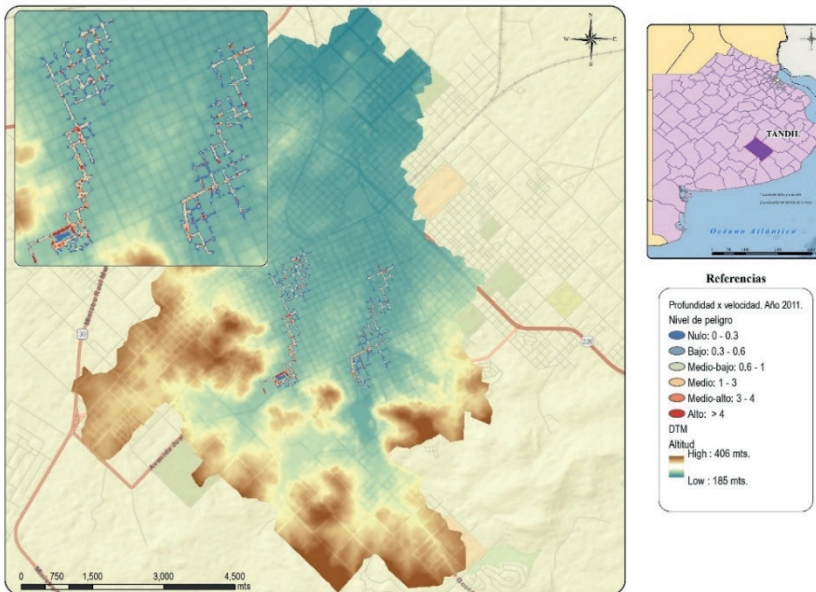


Figura 4. Nivel de peligro de inundaciones 2011.

Fuente: elaboración propia a partir de la escala de peligro AEMI 2013.

En líneas generales reflejan que aproximadamente 69 viviendas localizadas sobre el área anegada en las dos subcuencas poseen una calidad de conexión básica e insuficiente y respecto a la calidad de sus materiales se destaca que

más de 70 viviendas poseen calidad II, III y IV. Por último, para la variable calidad constructiva, aproximadamente 76 viviendas se ubican en construcciones básicas e insuficientes. Cada conjunto de variables urbanas materializadas en el territorio miden el grado de vulnerabilidad de la población frente a una amenaza latente y sienta las bases para conjugar otros indicadores que reflejen una visión integral del riesgo en cuencas urbanas. También podríamos construir nuevos parámetros para medir la amenaza en términos de la variabilidad del evento y predecir escenarios futuros. En esta línea dos conceptos resultan ser claves para la construcción de modelos simulación en el paradigma de riesgo: la resiliencia de los sistemas urbanos y la reducción de la incertidumbre.

5. Conclusiones

Los resultados de la modelización hidrodinámica llevada a cabo en entornos 2D han significado un gran desafío a la hora de lograr obtener un mapa que clasifique el peligro y la vulnerabilidad para un sector de la cuenca urbana de la ciudad de Tandil. En primer lugar, el riesgo de inundaciones en áreas urbanas plantea un enfoque que debe ser abordado desde la complejidad y el estudio de los procesos urbanos en forma interdisciplinar. El abordaje de la problemática como sistema complejo a partir de la mirada de una Geografía Aplicada permitió pensar en la transferencia y la importancia de generar un debate para la toma de decisiones o búsqueda de soluciones en gestión y planificación.

El análisis del peligro y la vulnerabilidad en base a las dimensiones del esquema analítico y las variables físicas y urbanas propuestas es central en cualquier tipo de escenario de modelización de riesgo. Si bien el mismo puede ser ramificado en más factores que permitirán explicar en forma integrada la detección de zonas inundables y anegadas en áreas de llanuras.

La evaluación del modelo hidrológico mediante umbrales de la escala técnica provista por AEMI y readaptados a una escala local permite dialogar con escenarios que ponen en discusión los principales ejes de la planificación urbana.

La detección de zonas anegadas e inundables permite reflexionar sobre nuevos esquemas propositivos para reducir la incertidumbre. Las hipótesis construidas a partir de los cambios en el comportamiento de algunos factores como el crecimiento y expansión de la ciudad, la variación en los hietogramas, la formulación de algunas medidas intensivas, como el incremento de superficies verdes y la modificación del código de zonificación de algunas áreas contribuirá a conciliar políticas de planificación y gestión a mediano plazo, monitorear y mitigar los impactos de eventos impredecibles, y constituirán la base para la formulación de planes, programas y proyectos basados en de la sustentabilidad ambiental y gestión integral del riesgo.

Reconocimiento

Este trabajo forma parte de una investigación en curso de la Máster María Lorena La Macchia, estudiante del doctorado en Ciencias Aplicadas Mención Ambiente y Salud (DCAAS, UNICEN, Argentina).

Bibliografía

- Australian Emergency Management Institute (AEMI) (2013). Managing the floodplain: A guide to best practice in flood risk management in Australia. *Australian Emergency Handbook*, (7), 110.
<https://knowledge.aidr.org.au/media/3521/adr-handbook-7.pdf>
- Australian Institute for Disaster Resilience (AIDR) (2014). Australian Disaster Resilience Guideline 7-3: Technical flood risk management guideline: Flood hazard, 3 pp.
<https://knowledge.aidr.org.au/media/1891/guideline-7-3-technical-flood-risk-management.pdf>
- Carballo, T. & Goldberg, S. (2014). Comunidad e información ambiental del riesgo. *Las inundaciones y el Río Luján*. Buenos Aires: Editorial Dunken, 165 pp.
- Cingolani, C. (2008). Tandilia. Las rocas y los fósiles más antiguos de la Argentina. Sitios de interés geológico de la República Argentina. CSIGA (ed.) Instituto de Geología y Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero Argentina. Buenos Aires. *Anales* 46 (II), 20. <http://repositorio.segemar.gov.ar/308849217/1348>
- Ferrando, F. (2006). Sobre inundaciones y anegamientos. *Revista de Urbanismo*, 15.
<https://revistaurbanismo.uchile.cl/index.php/RU/article/view/5129/5011>
- García, R. (2006). *Sistemas complejos: conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria*. Barcelona: Editorial Gedisa, 200 pp.
- García, R. (2011). Interdisciplinarietà y sistemas complejos. *Revista Latinoamericana de Metodología de las Ciencias Sociales ReLMeCS*, 1 (1), 66-101.
<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3869767.pdf>
- González, S., Torchia, N. & Viand, J. (2015). Inundaciones urbanas y cambio climático. En: *Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. Primera Parte. Inundaciones urbanas y cambio climático: Recomendaciones para la gestión* (38-54 y 73-78). Ciudad Autónoma de Buenos Aires.
<https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/manualinundaciones.pdf>
- Hydrologic Engineering Center (HEC) (2021a). *River Analysis System. 2D Modeling. Version 6.0. User's Manual. US Army Corps of Engineers*. Institute for Water Resources. Hydrologic Engineering Center. Davis, 289 pp.
https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_6.0_2D_Modeling_Users_Manual.pdf
- Hydrologic Engineering Center. HEC (2021b). *River Analysis System. Version 6.0. User's Manual. US Army Corps of Engineers*. Institute for Water Resources. Hydrologic Engineering Center. Davis, 705 pp.
https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_6.0_Users_Manual.pdf
- Herzer, H., Rodríguez, C., Celis, A., Bartolomé, M. & Caputo, G. (2002). Convivir con el riesgo o la gestión del riesgo. *Revista LA RED*, 16 pp.
https://www.researchgate.net/publication/237638971_CONVIVIR_CON_EL_RIESGO_O_LA_GESTION_DEL_RIESGO1
- La Macchia, M. L. (2015). *[Modelización y análisis espacial del drenaje urbano de la ciudad de Tandil mediante Tecnologías de la información Geográfica]*. Tesis de licenciatura en Geografía, Universidad Nacional del Centro, Provincia de Buenos Aires, 90 pp.
<https://www.riada.unicen.edu.ar/items/477c8bd2-df59-46f0-8f64-656d6793dfc3>

- La Macchia, M. L. & 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>
- Linares, S. & Picone, N. (2018). Application of Remote Sensing and Cellular Automata Model to Analyze and Simulate Urban Density Changes. Chapter 10. Section III. Monitoring, Analyzing, and Modeling Urban Growth. En Weng, Q., Quattrochi, D. & Gamba, P. Urban Remote Sensing. Second Edition. *Remote Sensing Applications*. Indiana State University. Terre Haute, Indiana, U.S.A., 20 pp. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781138586642>
- Maldonado, G. (2013). Sobre los distintos abordajes al estudio del riesgo y su dimensión ética. *Revista Reflexiones Geográficas*, 14 (14), 66-77. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/23695?show=full>
- Municipio de Tandil (octubre del 2023). Infraestructura de Datos Espaciales. IDE Tandil. <https://mapa.tandil.gov.ar/>
- Natenzon, C. (1998). Riesgo, vulnerabilidad e incertidumbre. *Desastres por inundaciones en Argentina*. PIRNA. Facultad de Filosofía y Letras. UBA, 16 pp.
- Pereyra, A. (2014). El riesgo a las inundaciones en la trama de los eventos extremos. En Carballo, T. & Goldberg, S. *Comunidad e información ambiental del riesgo. Las inundaciones y el Río Luján* (13-26). Buenos Aires: Editorial Dunken.
- Vera Rodríguez, J. M. & Albarracín Calderón, A. P. (2017). Metodología para el análisis de vulnerabilidad ante amenazas de inundación, remoción en masa y flujos torrenciales en cuencas hidrográficas. *Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 27 (2), 109-136. <http://www.scielo.org.co/pdf/cein/v27n2/0124-8170-cein-27-02-00109.pdf>