



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DE LA PROVINCIA
DE BUENOS AIRES**

FACULTAD DE AGRONOMÍA

**TESIS DE MAESTRÍA EN TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

**Modelización hidrodinámica bidimensional y riesgo de
inundación mediante TIG: Potencialidades de aplicación para
la cuenca urbana de la ciudad de Tandil desde una Geografía
Aplicada**

Lic. María Lorena La Macchia

Director: Dr. Santiago Linares

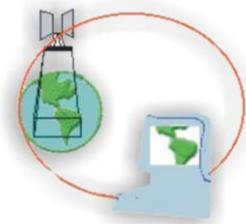
Co-Director: Dr. Ignacio Villanueva

Tandil, 2023.



ÍNDICE

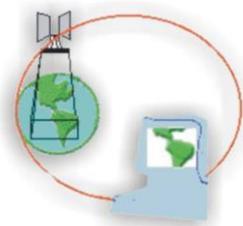
AGRADECIMIENTOS	1
INTRODUCCIÓN	4
<i>Estructura de la tesis</i>	8
1. El paradigma de la complejidad y la construcción del riesgo en las ciudades	12
<i>1.2 Estructura y dinámica de un sistema complejo</i>	13
<i>1.2.1 La importancia de la complejidad y la interdisciplina en estudios urbanos</i>	16
<i>1.2.2 Complejidad, geografía y riesgo en las ciudades</i>	18
<i>1.3 Procesos físicos y urbanos como factores de riesgo de inundaciones en áreas urbanas</i>	21
<i>1.4 Modelización hidrológico-hidráulica y análisis espacial del riesgo de inundaciones urbanas</i>	28
<i>1.5 Medidas para la reducción del riesgo de inundaciones urbanas: Planificación y ordenación del territorio</i>	43
2. La modelización de procesos hidrológicos urbanos: área de estudio, dimensiones de análisis y variables	51
<i>2.1. La configuración y dinámica territorial de la ciudad de Tandil</i>	53
<i>2.1.1 Caracterización de la cuenca urbana del Arroyo Langueyú</i>	62
<i>2.1.2 Ejes de crecimiento, expansión urbana y peligro de anegamiento en la ciudad de Tandil</i>	69



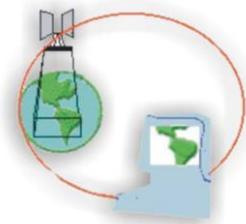
<i>2.2 Dimensiones de análisis, variables explicativas y técnicas de geoprocésamiento de la información geoespacial para la elaboración del modelado hidrológico del escurrimiento superficial</i>	<i>76</i>
<i>2.2.1 Modelos Digitales de Elevación (DEM) y tecnologías de precisión para la simulación de procesos hidrológicos y mitigación de inundaciones en áreas urbanas.....</i>	<i>80</i>
<i>2.2.2 Extracción y análisis de densidades urbanas mediante el procesamiento de imágenes satelitales 1996-2011.....</i>	<i>101</i>
<i>2.2.3 Edición vectorial de la red de infraestructura pluvial y su función en la red de drenaje.....</i>	<i>109</i>
<i>2.2.4 Registros pluviométricos para la modelización de eventos hidrometeorológicos.....</i>	<i>112</i>
3. Geografía, TIG y modelización para la gestión del riesgo de inundaciones	118
<i>3.1 Modelos hidrológicos e hidráulicos de precipitación-escorrentía. Tipologías y enfoques para su estudio</i>	<i>125</i>
<i>3.2. Potencialidades de la herramienta de modelización de crecidas HEC-RAS para la construcción de un modelo hidrodinámico bidimensional</i>	<i>137</i>
4. Esquema de interpretación del riesgo: peligro y vulnerabilidad...152	
<i>4.1 Escala de riesgo de inundaciones y directrices para la gestión del peligro. Australian Emergency Management (AEMI 2013).....</i>	<i>153</i>
<i>4.2 La zonificación de usos de suelo y la influencia de la infraestructura urbana de equipamientos colectivos en la detección de zonas inundables.....</i>	<i>157</i>



5. Modelización hidrodinámica, peligro y vulnerabilidad en la cuenca urbana de la ciudad de Tandil.....	172
<i>5.1 Desarrollo y evaluación del modelo hidrológico: Simulación de escenarios de profundidad y velocidad de flujo de escurrimiento 1996 y 2011.....</i>	<i>173</i>
<i>5.1.1 Análisis de correlación/asociación y discusión del modelo según variables físicas (topografía y pendiente) y urbanas (evolución de la superficie edificada, áreas verdes, red de infraestructura pluvial y pavimento).....</i>	<i>180</i>
<i>5.2 Análisis del riesgo: peligro y vulnerabilidad según la escala técnica australiana (AEMI 2013).....</i>	<i>185</i>
Consideraciones finales.....	196
<i>Bibliografía.....</i>	<i>201</i>
<i>Fuentes web utilizadas.....</i>	<i>221</i>
 <i>Índice de mapas</i>	
Mapa n°1. Contexto y localización de la ciudad de Tandil.....	54
Mapa n°2. Aglomerados urbanos de inclusión, vulnerabilidad y exclusión socioterritorial de la ciudad de Tandil.....	58
Mapa n°3. Densidad de población (hab./km ²).....	59
Mapa n°4. Densidad de viviendas particulares por km ²	60
Mapa n°5. Densidad de habitantes por vivienda.....	61



Mapa n°6. Localización de la cuenca Languyú dentro del sistema del Río salado.....	64
Mapa n°7. Red de drenaje en la circunscripción I de la ciudad de Tandil.....	66
Mapa n°8. Expansión urbana de la ciudad de Tandil. Período 1991-2002-2011.....	73
Mapa n°9. Peligro de anegamiento en la ciudad de Tandil. Evento 18/02/2012.....	74
Mapa n°10. Propiedades del proceso de escorrentía urbana (sin edificios).....	88
Mapa n°11. Subcuencas del arroyo Languyú en la circunscripción I.....	89
Mapa n°12. Ortomosaicos en zonas de interés.....	93
Mapa n°13. Generación de los DTM para las zonas de interés.....	93
Mapa n°14. DTM modificado y SRTM original.....	95
Mapa n°15. Toma de puntos de control mediante GPS.....	96
Mapa n°16. Selección de puntos GCP para la calibración del modelo.....	97
Mapa n°17. Densidades urbanas en la cuenca urbana de la ciudad de Tandil. Año 1996 y 2011.....	106
Mapa n°18. Red de infraestructura pluvial.....	110
Mapa n°19. Distribución anual de la precipitación (mm) y zonas de comportamiento pluviométrico homogéneo en la provincia de Buenos Aires y zonas aledañas. Período 1911-2000.....	114
Mapa n°20. Distribución de la precipitación media anual en la provincia de Buenos Aires para tres periodos de 30 años a lo largo del Siglo XX.....	115
Mapa n°21. Mapa de Interpolación (IDW) de lluvias según registros pluviométricos. Período 2010 - 2011. Ciudad de Tandil.....	116
Mapa n°22. Código de zonificación según PDT 2005	159
Mapa n°23. Espacios verdes y senderos recreativos de la ciudad de Tandil (año 2022).....	160
Mapa n°24. Red de pavimento de la ciudad de Tandil (año 2010).....	164
Mapa n°25. Calidad de las conexiones a los servicios básicos.....	166
Mapa n°26. Calidad de los materiales de las viviendas.....	168
Mapa n°27. Calidad constructiva de las viviendas.....	170
Mapa n°28. Escenario profundidad simulada 1996	173
Mapa n°29. Escenario profundidad simulada 2011	174
Mapa n°30. Escenario velocidad simulada 1996	175
Mapa n°31. Escenario velocidad simulada 2011	176
Mapa n°32. Diferencias profundidad simulada 1996-2011.....	178



Mapa n°33. Diferencias velocidad simulada 1996-2011.....	178
Mapa n°34. Dimensiones de análisis para la interpretación del riesgo de anegamiento.....	181-182-183
Mapa n°35. Nivel de peligro de inundaciones 2011.....	187
Mapa n°36. Vulnerabilidad de las viviendas en el área simulada. Año 2010 y 2020.....	189
Mapa n°37. Impactos en la zonificación de usos de suelo.....	191

Índice de figuras

Figura n°1. Los impactos de la urbanización en el ciclo del agua.....	26
Figura n°2. Riesgo de inundación como interacción de la amenaza (probabilidad e intensidad) y la vulnerabilidad (exposición y susceptibilidad).....	32
Figura n°3. Imágenes del evento real en comparación con la simulación.....	41
Figura n°4. Bosquejo geológico general de Tandilia.....	56
Figura n°5. A. Sistema hidrológico típico y B. Sistema hidrológico no típico.....	63
Figura n°6. Dique del Fuerte.....	68
Figura n°7. Ramal H.....	69
Figura n°8. Impactos del proceso de expansión en áreas urbanas.....	71
Figura n°9. Esquema analítico para la elaboración del modelado hidrológico.....	78
Figura n°10. Técnicas de filtrado en DSM para obtener un DTM.....	82
Figura n°11. Naturaleza escalonada de las cuadrículas DEM con un espaciado de cuadrícula creciente.....	84
Figura n°12. DEM de la circunscripción I de la ciudad de Tandil.....	86
Figura n°13. Parámetros morfométricos del DEM.....	87
Figura n°14. Ejemplo de procesamiento en PIX4D. Dique del Fuerte.....	91
Figura n°15. Ejemplo de procesamiento en ODM (consola). Dique del Fuerte.....	91
Figura n°16. Ortomosaicos y DSM de las zonas de interés	94
Figura n°17. Ecuaciones para cálculo de errores.....	98
Figura n°18. Componentes de un sistema de teledetección.....	101
Figura n°19. Reajuste de las firmas espectrales para cada clase según bandas del satélite Landsat 5 TM.....	105
Figura n°20. Los Sistemas de Información Geográfica como Sistemas Expertos.....	122

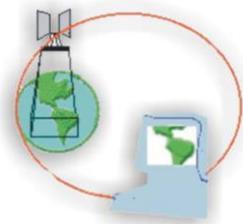


Figura n°21. Tipo de modelos según la representación de la superficie de la cuenca.....	127
Figura n°22. Modelos 1D, cuasi 2D y 2D.....	129
Figura n°23. Representación de modelos 1D y 2D.....	130
Figura n°24. Tipos de mallas utilizadas en modelos 2D.....	132
Figura n°25. Conexiones entre modelos hidrológicos, hidráulicos y los SIG.....	135
Figura n°26. ¿Modelos 1D o 2D?.....	138
Figura n°27. Esquema de representación del modelo de datos en superposición de capas.....	139
Figura n°28. Construcción de la red geométrica en HEC-GeoRAS.....	142
Figura n°29. Importación de la geometría de la red en HEC-RAS.....	143
Figura n°30. Modelo Digital del Terreno de la circunscripción I y recorte a la cuenca urbana Languayú.....	145
Figura n°31. Asignación de coeficientes de rugosidad según variables físicas y densidades urbanas.....	146
Figura n°32. Delimitación del área de mallado a modelar.....	147
Figura n°33. Definición de las condiciones de contorno del área de mallado.....	148
Figura n°34. Introducción del hietograma mediante HEC-RAS.....	150
Figura n°35. Configuración de los resultados de la simulación.....	151
Figura n°36. Proceso para cuantificar el peligro de inundación.....	154
Figura n°37. Sendas aeróbicas, parques y espacios recreativos.....	161

Índice de tablas

Tabla n°1. Evaluación del error entre DTM.....	98
Tabla n°2. Cálculo de superficies por m ² y ha según categoría de Densidades urbanas.....	107
Tabla n°3. Atributos de la red de infraestructura pluvial.....	111
Tabla n°4. Amenazas según umbrales de vulnerabilidad.....	156
Tabla n°5. Límites de clasificación de umbrales de vulnerabilidad.....	157
Tabla n°6. Asociación de variables físicas y urbanas en el área simulada 2011.....	184
Tabla n°7. Adaptación de la escala de peligro AEMI 2013.....	186
Tabla n°8. Superficies de los niveles de peligro (m ²).....	188
Tabla n°9. Superficie de zonas del PDT afectadas por el evento (m ²).....	192



Tabla n°10. Superficie de densidades urbanas afectadas por el evento (m ²)	193
Tabla n°11. Viviendas afectadas según equipamientos colectivos: calidad de conexión a los servicios, calidad de los materiales y calidad constructiva	194

Índice de gráficos

Gráfico n°1. Hietogramas de los eventos de mayo y agosto (2017), septiembre (2018) y enero (2022).....	149
Gráfico n°2. Representación de D x V en un hidrograma de un evento de inundación.....	156
Gráfico n°3. Superficies de los niveles de peligro (m ²)	188
Gráfico n°4. Superficie de zonas del PDT afectadas por el evento (m ²).....	192
Gráfico n°5. Superficie de densidades urbanas afectadas por el evento (m ²).....	193
Gráfico n°6. Número de viviendas afectadas según la calidad de los equipamientos colectivos	195

Índice de cuadros

Cuadro n°1. Tipos de medidas para el manejo y control de las inundaciones.....	47
Cuadro n°2. Tipos de medidas estructurales	49



AGRADECIMIENTOS

El trabajo de esta tesis es resultado de un gran camino que comencé allá por el año 2016. Luego de mi tesis de grado, necesité replantear todo mi “status quo”: vínculos, mandatos familiares y sociales, viejas estructuras; todo ello cruzado con mis objetivos, mis deseos, anhelos y mis metas, que sólo iban hacia una línea: VOLVER A MÌ.

Ese año fue considerado “*visagra*”. Me enfrenté de lleno a cada uno de mis miedos, inseguridades acompañadas de estados muy difíciles de soledad, culpa y ansiedad, de querer que pasara rápido el tiempo para poner la energía donde debía, volver a enfocarme, pero no podía, era necesario volver a encontrar “MI NORTE”, que por cierto, lo llevo tatuado en mi piel para no volver a perderme.

Fruto de un gran trabajo interno, de conocerme, re-conocerme, volver a verme, vincularme “desde otro lugar”, como un narrador omnipresente que se ubica fuera de las escenas de una historia, permitieron “*esculpirme*”, transformarme, evolucionar, viajar más liviana y SER la persona que hoy reconozco frente a MI espejo.

Perdón por las palabras dichas anteriormente, pero sin ese proceso que creo que continúa toda la vida para permitirnos evolucionar, hoy no podría estar escribiendo esta tesis que tantas satisfacciones me trajo. Si, muchas satisfacciones; más allá de que hayan pasado unos añitos de mi cursada de la Maestría, sirvieron para madurar las hipótesis y el gran trabajo teórico y metodológico para seguir ahondando en este desafío de trabajar sobre una temática que siempre demostró mi interés desde mis primeros pasos en el camino hacia la investigación. Obviamente ese recorrido estuvo acompañado de muchos obstáculos asociados a la falta de recursos, sin sabores, desmotivación, desesperanza, pero poco a poco, en la interdisciplina, en nuevos cursos y en el aprendizaje en equipo, fui encontrando en el camino colegas y profesionales que me fueron guiando e incentivando en la importancia de la aplicabilidad y transferencia de este trabajo.

En este sentido las satisfacciones me llevan a pensar en todas las personas que formaron parte de dicho crecimiento, maduración de conocimientos, aprendizaje continuo asociado también a ese proceso interno que hoy permite RE- definirme y SER: Por ello, GRACIAS!!!:

A mi director Dr. Santiago Linares, por guiarme desde mis primeros pasos, apostando incondicionalmente a seguir profundizando en esta temática que fue teniendo sus



matices, pero siempre pensando en los objetivos a los cuales quería llegar en cada momento; a mis audios de más de 5 minutos (*"diarios íntimos"*) replanteándome cada etapa y a sus palabras tan justas y acertadas para garantizar el aporte metodológico y transferencia de esta tesis. Un placer conformar parte de tu equipo de geotecnologías y crecer a diario con esta mirada aplicada de nuestra disciplina;

A mi Co-director Dr. Ignacio Villanueva por su excelente predisposición a la hora de aceptar acompañarme desde su formación proveniente de las Ciencias Físicas generando aportes, críticas y contribuciones bibliográficas para trabajar bajo una mirada desde la Geografía aplicada en la modelización mediante métodos numéricos computacionales. Sin duda fue un antes y un después el haber participado de sus cursos de postgrado y poder vislumbrar mis objetivos a partir de ellos;

A la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires por permitirme transitar, resignificar conocimientos y continuar mi formación académica en el uso y profundización de las herramientas derivadas de la Teledetección y los Sistemas de información Geográfica;

A los Dres. Guillermo Collazos, investigador del Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA) de la ciudad de Azul y nuevamente a Ignacio Villanueva, investigador y consultor de la Universidad de Zaragoza, España, y hoy radicado en Argentina, en el IHLLA, quienes siempre dispuestos y con entusiasmo, me abrieron puertas para salir de mi zona de confort y me permitieron *"ver"* materializada la tesis que hoy les presento, enriqueciendo teórica y metodológicamente la investigación desde mi disciplina;

Al Dr. Pablo Rinaldi, investigador del Instituto PLADEMA-UNICEN por haberme brindado su apoyo y conocimiento durante mi tesis de grado a partir de la utilización del Software AQUA II en la modelización del escurrimiento superficial y acompañarme en las últimas instancias del desarrollo de esta investigación, a partir de su colaboración con vuelos de drones, fundamentales para validar resultados y responder nuevos interrogantes como desafíos futuros en un próximo proyecto;

Un agradecimiento muy profundo va dirigido a tres personas que fueron centrales en la culminación y validación de esta investigación hacia una siguiente etapa: mi amigo, colega y gran *"coequiper"* de proyectos compartidos, Mauro Ortmann, por acompañarme, orientarme y guiar mi trabajo de campo; mi colega, Juliana Romero, que con su gesto desinteresado, me cedió su dron personal para volar zonas relevantes del área de estudio; y a un gran hallazgo con el que compartí cursos de postgrado durante



el camino recorrido, Roberto Fernández, por brindarme sus conocimientos y experticia en el campo de la hidrología y ayudarme en el procesamiento y mejoras de los productos obtenidos para la simulación;

A mi lugar de trabajo de todos los días, el Instituto de Geografía, Historia y Ciencias Sociales (IGEHCs) y mi equipo de Personal de Apoyo (CPA-CONICET) el cual coincide con mi etapa de mayor plenitud, asociada al crecimiento personal y profesional, al aprendizaje en equipo y formación permanente no sólo desde la carrera de apoyo técnico sino también hacia el camino de la investigación aplicada;

A mi Familia, por ser mi cable a tierra, por brindarme esa contención cuando la he necesitado, por apoyar mi vuelo en momentos dónde costó soltar y entender que ese crecimiento y ese despegue personal debía hacerlo para poder SER la persona que soy; cada uno de ustedes sigue siendo mi sostén y hacen que no olvide las raíces de dónde vengo y los valores que he ido y voy construyendo;

A mis amigas de la vida y del *crossfit*, por su complicidad y amistad incondicional, por cada palabra, cada experiencia vivida y compartida; por nuestros viajes y hermosos momentos, por esos audios eternos y análisis interminables que permite interpelarnos todos los días desde cada lugar, profesionalmente y desde la vida diaria en base a nuestros miedos, inseguridades, deseos, sueños, proyectos y metas por concretar; siempre dije y sostuve que los/as AMIGOS/AS SALVAN, te hacen ver la vida desde otra perspectiva y te da la seguridad y firmeza que necesitas en cada paso, para ayudar a tu evolución y vuelo;

A mis compañeros/as y hoy colegas de la Maestría en Teledetección y SIG, por brindarme momentos cálidos y divertidos en un espacio dónde también nos permitía debatir y reflexionar sobre nuestra profesión y ampliar nuestra mirada desde la diversidad de aprendizajes; por su compañía, confianza y motivación en estos años para que esta tesis pudiera tener un cierre.

Finalmente no quiero olvidarme de Rodrigo, quien sigue dejando ese espacio vacío dentro de mí; estás en mi corazón siempre. Y Rocky, con todo su amor y sus mimos, hizo hasta hace poquito tiempo que lo sienta más cerquita y se convierta en una parte importante de mi alegría de todos los días.

DICEN QUE LAS MEJORES COSAS SE VIVEN CUANDO SON COMPARTIDAS, sin ustedes caminando a mi lado nada de esto hubiese ocurrido... Es por eso que forman parte de este logro y HOY lo festejamos juntos/as!!!.



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. Es decir, se necesita del diálogo e integración de diferentes enfoques para trabajar una problemática.

“No solo la heterogeneidad es lo que caracteriza a los subsistemas sino también la interdefinibilidad y mutua dependencia de las funciones que cumplen dichos elementos dentro del sistema total. Por ello se excluye la posibilidad de obtener un análisis de un sistema complejo por la simple adición de estudios sectoriales correspondientes a cada uno de los elementos” (García, 2011; 67).

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; procesos físicos-naturales, sociales, económicos y políticos asociados, cuyas interrelaciones e interacciones definen y redefinen la totalidad del sistema. 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 de análisis que redefinen en forma permanente sus relaciones.

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. Si definimos el subsistema social a partir del proceso de urbanización y expansión urbana de las ciudades, el subsistema político institucional vinculado con el socioeconómico, dado por el ordenamiento, la planificación en regularización de usos del suelo, las actividades productivas, el desarrollo de infraestructura, y el subsistema natural entendiendo los procesos físicos que se materializan en el territorio como la topografía,



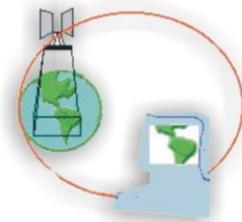
la pendiente, el drenaje y las variables propias del ciclo hidrológico, entenderíamos que esas interrelaciones entre los subsistemas generan respuestas del ambiente y el ecosistema urbano afectando la capacidad de carga del territorio.

Respecto al subsistema natural, Ferrando (2006) desarrolla una diferenciación entre anegamientos e inundaciones a partir del estudio de la recurrencia de las crecidas. “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” (2006; p.26).

Siguiendo a los autores, 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.

La resiliencia y capacidad de adaptación de los ecosistemas a la amenaza (peligrosidad) y vulnerabilidad (exposición) indican que una visión integral del riesgo es fundamental para pensar en la construcción y el desarrollo de ciudades sostenibles.

El área de estudio de este trabajo de investigación es la ciudad de Tandil ubicada al SE de la provincia de Buenos Aires en la cuenca urbana del arroyo Languyú que atraviesa la circunscripción I del partido homónimo. 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 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 arroyos Blanco y del Fuerte, ambos colectores que dan origen al Arroyo Langueyú. 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. Estas hipótesis de trabajo generan incongruencias en la planificación de usos de suelo residencial y no residencial disminuyendo espacios verdes, superficies de infiltración y creando nuevas actividades productivas resultado de la especulación inmobiliaria y el auge del turismo. 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. Tal es así que los procesos de ocupación y transformación del espacio nos permiten entender el modelo de desarrollo existente en las áreas urbanas y la falta de una lógica coherente con las premisas del desarrollo sustentable sobre todo para explicar el problema de las inundaciones. 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.

Esta investigación tiene como objetivo construir un modelo hidrológico bidimensional para simular el escurrimiento y drenaje superficial de la cuenca urbana de la ciudad de Tandil detectando áreas inundadas y anegadas durante y después del

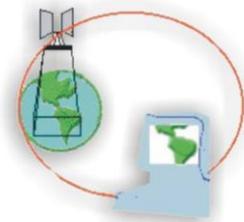


transcurso de un evento hidrometeorológico. El mismo será definido a partir de un Modelo Digital de Elevación (DEM), donde la topografía del terreno tendrá sus propios parámetros para la simulación del proceso de escorrentía superficial teniendo en cuenta variables hidrológicas, físicas y urbanas. A mediano plazo se integrará un modelo hidráulico que represente la red de drenaje definida por la infraestructura pluvial y las obras hidráulicas existentes en la topografía natural del terreno. El resultado será poder generar un modelo hidrodinámico de escurrimiento mediante la combinación de las herramientas *HEC-GeoRAS* y *Hec-RAS*. Se analizarán dos momentos 1996 y 2011 extrayendo mapas de velocidad y profundidad del anegamiento superficial. 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 peligro a partir de la determinación de una escala técnica, utilizada por el Instituto de Resiliencia ante desastres de Australia (AEMI) que define umbrales en base al producto de mapas de velocidades y profundidades. Posteriormente se compararán los escenarios postprocesamiento mediante álgebra de capas en el Sistema de Información Geográfica *ArcGIS®*¹ según las dimensiones y variables de análisis.

El aporte de las modelizaciones y el planteo de nuevos escenarios en función de los parámetros definidos en la ejecución de las simulaciones permitirán delimitar sectores vulnerables derivados de la probabilidad de ocurrencia en zonas y áreas cercanas.

Por último, la determinación de estas zonas nos invita a 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 evaluación del tiempo de permanencia del agua en las zonas anegadas a partir del trabajo en campo, 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,

¹ Software: ArcGIS [software GIS]. Versión 10.0. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute, Inc., 2010.



programas y proyectos basados en de la sustentabilidad ambiental y gestión integral del riesgo.

Estructura de la tesis

Esta investigación está organizada en tres apartados. El primero de ellos contiene el marco teórico conceptual titulado **El paradigma de la complejidad y la construcción del riesgo en las ciudades** que intenta abrir la discusión sobre cómo se construye y utiliza el concepto de riesgo dentro del paradigma de la complejidad.

El estudio del riesgo en las ciudades posee diversos enfoques sobre los cuales es interesante analizar su concepción desde la Geografía y sus aportes; las dimensiones y abordajes posibles que permiten estudiar el problema implicando políticas de intervención diferentes en cada caso y finalmente la necesidad de potenciar una mirada integral e interdisciplinar para trabajar y analizar procesos urbanos desde una óptica compleja. En este sentido se define un sistema complejo, sus componentes y elementos constitutivos como una totalidad en interacción y redefinición permanente y se hace énfasis en los subsistemas factores de riesgo de inundaciones en áreas urbanas vinculando el abordaje desde la complejidad y la teoría social del riesgo.

Finalmente se indaga en los antecedentes técnicos y metodológicos de la temática objeto de estudio y los aportes de las geotecnologías tanto en el área disciplinar como interdisciplinar para el análisis espacial, el mapeo del riesgo de inundaciones, la modelización hidrológico-hidráulica y las medidas de control y mitigación para la reducción del riesgo en cuencas urbanas.

El segundo apartado hace referencia al marco técnico metodológico dividido en tres secciones. **La modelización de procesos hidrológicos urbanos: área de estudio, dimensiones de análisis y variables** sitúa la investigación en una ciudad intermedia donde se analiza la configuración socioespacial y construcción del espacio urbano de la ciudad de Tandil. Se caracteriza la cuenca urbana del Arroyo Langueyú y se analizan los ejes de crecimiento y expansión urbana según el peligro de anegamiento en el área urbana y complementaria. Aquí se exponen los resultados obtenidos en el trabajo que precede a esta tesis mediante la evaluación del mapa síntesis del peligro de anegamiento (La Macchia, 2015) y se detectan zonas testigo para la elaboración de



nuevos escenarios que derivan del comportamiento del modelo y su capacidad de dar respuesta frente a las dimensiones de análisis presentadas en el esquema del modelo de datos. Los indicadores para la simulación de procesos hidrológicos, el monitoreo y la mitigación de inundaciones en áreas urbanas partirán del uso de un DEM, la extracción y análisis de densidades urbanas, la red de infraestructura pluvial y su función dentro de la cuenca de drenaje y la importancia de los registros pluviométricos para modelar eventos hidrometeorológicos.

En la segunda sección **Geografía, TIG y modelización para la gestión del riesgo de inundaciones** se aborda el rol adquirido por las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) en el tratamiento, procesamiento y análisis de la información espacial, y la Geografía como disciplina y campo de aplicación de las modelizaciones.

Se afirma que los procesos y problemas espaciales urbanos estudiados a partir de la construcción de modelos permiten acercarnos a la realidad compleja y predecir escenarios a corto y mediano plazo. Las modelizaciones parten de información espacial y temporal determinada por nuestra escala de trabajo, variables y atributos de cada una de las dimensiones y factores que permiten explicar nuestro problema de investigación. La extracción de información mediante el aporte de fuentes derivadas de las técnicas de la teledetección para estudiar fenómenos urbanos como, imágenes satelitales, el uso de modelos digitales de elevación y las tecnologías drone constituyen un eslabón fundamental a la hora de modelar procesos hidrológicos, elaborar mapas de riesgo de inundación y cuantificar el peligro en cuencas urbanas a partir de las simulaciones de escenarios.

Metodológicamente se expone la importancia de trabajar con modelos numéricos de precipitación-escorrentía para la gestión integral de crecidas e inundaciones. Se analizaron las potencialidades del trabajo a escala bidimensional para la modelización hidrológico-hidráulica y la detección de zonas de riesgo de inundabilidad y anegamiento en cuencas urbanas. En esta línea, el apartado detalla las especificidades del uso de la herramienta de modelización de crecidas *Hec-RAS* para la obtención de los insumos planteados en las dimensiones y variables. Este programa ampliamente utilizado por la ingeniería civil permitió comenzar a construir y configurar un modelo hidrológico hidráulico a partir del cual se simularán escenarios que luego se procesarán en *ArcGIS®* planteando nuevas hipótesis de trabajo. La configuración del modelo hidrodinámico depende del procesamiento de variables físicas y urbanas y la selección de nuevos



parámetros de modelización para responder diversos interrogantes durante el transcurso de las simulaciones.

Finalmente, la última sección titulada **Esquema de interpretación del riesgo: Peligro y Vulnerabilidad** expone y analiza la escala técnica de peligro de riesgo utilizado por el Instituto de resiliencia australiana ante desastres para la gestión y monitoreo de inundaciones (AEMI 2013). Esta guía refleja el esquema de interpretación del riesgo analizando el peligro y la vulnerabilidad. Los resultados obtenidos de los modelos de simulación dependen de su resolución espacial, escala, nivel de detalle al interior de la topografía y el enfoque de modelado. Se describen los parámetros que miden el peligro, la variabilidad y se explica cómo se cuantifica el grado de riesgo mediante la determinación de umbrales para los escenarios obtenidos a partir de las simulaciones en *Hec-RAS*. Asimismo se explicita de qué manera interviene la zonificación de usos de suelo y la influencia de la infraestructura urbana de equipamientos colectivos en la detección de zonas inundables y se traducen en un mayor o menor grado de peligro.

El tercer y último apartado refiere a los resultados del trabajo de investigación y se encuentra organizado en dos secciones.

La primera, **modelización hidrodinámica, peligro y vulnerabilidad en la cuenca urbana de la ciudad de Tandil** presenta los escenarios de profundidad y velocidad simulados en dos momentos y analiza los resultados según cada una de las dimensiones para la interpretación de las zonas anegadas e inundables de la ciudad. La segunda, **análisis del riesgo: peligro y vulnerabilidad según la escala técnica australiana (AEMI 2013)** define valores umbrales en los píxeles de los escenarios simulados para determinar mediante la escala técnica de peligro las zonas más vulnerables. El producto de los mapas de velocidad y profundidad sumados al álgebra de capas y su análisis zonal en *ArcGIS®* serán de gran aplicabilidad para generar nuevas preguntas derivadas de las hipótesis de trabajo.

Para concluir los resultados de esta tesis no son más que un camino a seguir recorriendo e indagando en los interrogantes basados en la predicción de nuevos escenarios con el objetivo de reducir la incertidumbre. La consideración de nuevas variables predictivas, ponderadas dentro de la configuración del modelo e incorporando otras dimensiones del riesgo que hagan más énfasis en la ecuación vulnerabilidad y

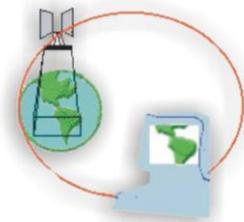


exposición, analizará la capacidad, posibilidad de adaptación y resiliencia de los ecosistemas urbanos ante el peligro y la amenaza.

El desarrollo de planes de emergencia y medidas de acción integral tanto estructural como semi-estructural serán fundamentales para brindar respuestas y políticas de intervención en cada simulación del modelo hidrológico-hidráulico. Asimismo no debemos olvidar la importancia de la validación, calibración, precisión y ajuste permanente en la configuración del modelo desde la primera etapa de este trabajo hacia la predicción y proyección de nuevos escenarios e impactos a corto y mediano plazo.

Siguiendo un propósito de transferencia esta investigación permitirá analizar las fortalezas y debilidades para la construcción, desarrollo y proyección de la ciudad de Tandil, con potencial replicación a otras áreas urbanas que pretendan constituirse en ciudades sustentables y/o sostenibles coherentes con los procesos de ocupación y expansión urbana que acontecen en la actualidad.

Las consideraciones y conclusiones arribadas intentan ser un instrumento de ayuda a los agentes tomadores de decisión en la planificación y gestión territorial tanto pública como privada posibilitando la necesidad de trabajar y dialogar en forma interdisciplinaria y desde una gestión integral del riesgo.



1. El paradigma de la complejidad y la construcción del riesgo en las ciudades

La construcción del riesgo en las ciudades invita a pensar en la configuración, dinámica y desarrollo de una ciudad desde su historicidad y espacialidad. Estas dimensiones temporal y espacial permiten analizar procesos como el uso y las transformaciones del suelo urbano, la densificación y expansión del ámbito de la ciudad, así como la existencia y mantenimiento de su infraestructura. En esta línea los actores sociales que configuran y reconfiguran el territorio, su apropiación y consumo, plantean una nueva dialéctica entre la sociedad y la naturaleza que genera diversos impactos. Por lo tanto se plantea el problema clave de cómo conciliar los intereses públicos, que se expresan en las políticas urbanas, tendientes a satisfacer el bien común con los intereses de los actores privados, bajo el desarrollo de un modelo más productivista, dinámico e integrado producto de la lógica capitalista y de circulación del capital. Sin duda la construcción del riesgo es un proceso social e histórico producto de conflictos de intereses, bienes y accesos diferenciales tanto en lo público como privado que implica un estudio desde una perspectiva compleja y por lo cual la concepción del riesgo se analiza mediante dimensiones diferentes.

Hilda Herzer (2011) señala que una visión amplia sobre el ambiente urbano debería partir del reconocimiento de la fragmentación social de la ciudad, identificando las relaciones entre la sociedad y su ambiente, las relaciones entre diversos actores sociales y las articulaciones entre las escalas local y regional. Así, habrá interpretaciones diferentes acerca de la existencia y de la magnitud de las acciones, del posible deterioro ambiental y de la construcción del riesgo. “Por ejemplo, frente a un caso de competencia por el uso del suelo urbano (instalaciones comerciales y espacios verdes), los propietarios de tierra urbana, los empresarios, los científicos, los niveles estatales implicados y los representantes del poder político tienen visiones diferentes acerca de lo que tales emprendimientos pueden producir. Esto sugiere que la definición del uso del espacio conlleva aspectos ecológicos, políticos, sociales, económicos, culturales y técnicos que merecen ser analizados cuidadosamente” (Herzer; 2011, p.2).

En líneas generales la ciudad siempre ha sido escenario de riesgo. Algunos estudios están orientados a hacer énfasis en las amenazas, los fenómenos físicos detonadores y en los impactos y respuestas a estos eventos; en otros, a la fragilidad estructural de



las edificaciones y a la falta de inversión o viceversa, al proceso de ocupación y asentamiento de la población en zonas vulnerables no planificadas para su crecimiento y a la capacidad de adaptación y/o resiliencia de las sociedades para hacer frente a esos impactos. En todos los casos el riesgo se construye socialmente a partir del modelo de desarrollo, condicionado por la segregación y fragmentación socioespacial existente.

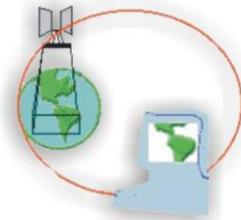
Rolando García (2006) señala que se deben comprender las interacciones entre el hombre y la naturaleza y dejar de considerar la naturaleza como el único agente del desastre. Los factores físicos pueden ser poderosos detonadores de acontecimientos, pero las fuerzas conductoras reales son sociales. Es la naturaleza de esas fuerzas sociales las que determina que ocurrirá, dónde y a quién. Para agregar, Maldonado (2013) sostiene que la contraposición sociedad-naturaleza es una construcción del siglo XIX; la naturaleza está sometida y agotada a finales del siglo XX y, de este modo, ha pasado de ser un fenómeno dado a ser un fenómeno producido.

Para finalizar, la cuestión ambiental, según Moisés Rodríguez (1998), debe ser comprendida dentro de la sociedad, no como problemas relacionados a la naturaleza, sino como problemáticas visibles por medio de diferentes problemas, producto de una actuación global de la sociedad, resultado del modo de producción y de las formas por las cuales se da la apropiación, el consumo y la producción del espacio urbano. Esta producción social del espacio es el lugar donde se producen y reproducen relaciones socioespaciales dominantes de producción y reproducción como parte integrante de las relaciones sociales con la naturaleza. En esta línea se entiende “el problema ambiental como *producción destructiva*, un producto producido por las formas en las que la sociedad se apropia de la naturaleza” (Rodríguez, 1998, p.103).

1.2 Estructura y dinámica de un sistema complejo

La comprensión del funcionamiento de un sistema complejo requiere un análisis histórico de los procesos que condujeron al estado actual de la estructura del sistema. Es decir el contexto económico, social y político de país configura las relaciones e interrelaciones de los elementos y definen las condiciones de contorno a partir de la escala espacial y temporal del problema complejo a analizar.

Las etapas de diagnóstico y evolución mencionadas en el apartado anterior dan cuenta que primeramente debemos dedicarnos a la construcción de sucesivos modelos



que representen la realidad que queremos estudiar. Incluso podemos afirmar que esta construcción también forma parte de la metodología propuesta para desarrollar un trabajo interdisciplinario. Mediante el testeo y las aproximaciones para construir el sistema reconocemos los fenómenos que tienen lugar en el territorio y han generado o están generados por procesos de deterioro en el ambiente urbano, físico y social. Así, la construcción o conceptualización del sistema sólo puede basarse en su capacidad de explicar un funcionamiento que dé cuenta de los hechos observados constituyendo la “realidad” que es objeto de estudio. Esta realidad debe ser reconstruida a partir de los estudios históricos definiendo y analizando los principales procesos que determinan el funcionamiento del sistema. “La relación entre función y estructura (o entre procesos y estados) es la clave para la comprensión de los fenómenos” (García; 2011, 98).

Olaf Jovanovich (2014) sostiene que en un sistema complejo, la relación entre las partes, subsistemas, produce propiedades emergentes en el todo, esto se traduce en propiedades que no existen en las partes, pero que nacen de las relaciones entre ellas. En esta línea si estudiamos las ciudades como sistemas complejos podemos dilucidar que los procesos que la definen y delinear pueden construir ciudades funcionales a determinados intereses y actores. Por ejemplo, ciudades disfuncionales en materia de configuración, planificación y ocupación territorial, ciudades sustentables o inteligentes o ciudades fragmentadas, segregadas o difusas.

Los subsistemas que conforman la estructura interna de la ciudad y que, a la vez, son sistemas de un nivel inferior de complejidad están integrados principalmente por el sistema normativo y político institucional donde yacen las estructuras y procesos políticos institucionales y culturales; el sistema territorial con su componente espacio-temporal y su dinámica territorial; el sistema económico productivo definido por el modelo de desarrollo y crecimiento de la ciudad y, por último, el sistema de participación de la ciudadanía y su capacidad de adaptación a los fenómenos funcionales, estructuras y procesos sociales. Las relaciones entre los subsistemas siguen siendo los que estructuran, los que producen orden, restricciones e innovaciones en la ciudad.

Para reforzar esta idea se sostiene que los procesos describen los cambios que tienen lugar en el sistema (García, 2006). La teoría de los sistemas complejos distingue los procesos de *primer nivel*, que constituyen el efecto local sobre el medio físico o sobre la sociedad que lo habita y lo explota, de procesos más amplios que tienen lugar en otros niveles. Un *segundo nivel* corresponde a procesos más generales que denomina



metaprocesos, y que gobiernan o determinan los procesos de primer nivel y por último, los metaprocesos pueden, a su vez, estar determinados por procesos de *tercer nivel*.

“Los distintos niveles de procesos requieren niveles de análisis diferentes. Pensando en la escala de los fenómenos, los procesos de primer nivel son esencialmente locales; los procesos de segundo nivel son regionales o nacionales y los de tercer nivel son nacionales e internacionales. Los tres niveles tienen dinámicas diferentes y actores diferentes. Están, sin embargo, claramente interrelacionados: el análisis de los procesos del tercer nivel provee una explicación de los procesos del segundo nivel; el análisis de este último provee una explicación de los procesos del primer nivel” (García, 2006, p.59).

Rolando García (2006) plantea que la mayor dificultad en el estudio de la dinámica de los sistemas complejos es el juego dialéctico de la doble direccionalidad de los procesos detectados; desde la modificación de los elementos a los cambios del funcionamiento de la totalidad, y de los cambios de funcionamiento a la reorganización de los elementos. Aquí hacemos referencia a las interrelaciones y alteraciones producidas entre y para los subsistemas. Esto ocurre porque los flujos (entradas y salidas) que se desarrollan dentro del sistema dan cuenta de cómo el mismo interactúa y se relaciona con el exterior, es lo que en términos de García (2006) denomina condiciones de contorno. La organización interna del sistema, como totalidad, se encuentra siempre perturbada por esos flujos que pueden desarrollarse en cualquier punto del sistema. Cuando la magnitud de esas perturbaciones supera el umbral que excede su estabilidad, se vuelve inestable y corre el riesgo de ser vulnerable. Por ello se debe hacer énfasis en la resiliencia, es decir, en la capacidad del sistema para adaptarse a las perturbaciones que lo desestabilizan y conformar así, un nuevo orden, una estabilidad dentro de esa estructura.

Para finalizar, si en términos estructurales no se logra un balance entre los subsistemas que involucra la ciudad y no se trabaja en políticas de intervención integrales, esto es, que atiendan a las necesidades de los actores que consumen y producen el espacio y permitan pensar en la construcción de ciudades sustentables, en consonancia con los conceptos de capacidad de carga y justicia socioespacial, es evidente que el conflicto más importante a resolver es la relación entre las lógicas de ocupación, planificación y las formas de tomar decisiones en torno a la ciudad y sus códigos, las relaciones entre la norma y la especulación inmobiliaria. Estos conceptos que se esbozan son clave para el análisis y desarrollo de esta investigación.



1.2.1 La importancia de la complejidad y la interdisciplina en estudios urbanos

La complejidad como concepto para estudiar los procesos espaciales urbanos supone la confluencia de múltiples procesos cuyas interrelaciones constituyen la estructura de un sistema que funciona como una totalidad organizada. Los sistemas complejos según lo define Rolando García requiere un estudio integrado de la totalidad, la cual, debe surgir de la labor de un equipo con marcos epistémicos, conceptuales y metodológicos compartidos. Por lo tanto esta concepción forma parte de un paradigma teórico y metodológico; una nueva óptica para estudiar y analizar la realidad e intervenir sobre ella.

Los elementos que integran el sistema están caracterizados por su heterogeneidad, interdefinibilidad y mutua dependencia de las funciones que cumplen dentro del sistema total (García, 2011). En este sentido es fundamental definir las escalas espaciales y temporales para determinar su evolución, dinámica y velocidad de cambio, por lo cual, es imposible poder establecer recortes u obtener un análisis sectoriales de cada uno de sus elementos.

El término complejidad pone énfasis en el poder dado por las interrelaciones entre los componentes de un sistema, cuyas funciones no son independientes. El conjunto de sus relaciones constituye la estructura, que da al sistema la forma de organización que le hace funcionar como una totalidad. De ello deriva aquí el nombre de “sistema”.

La metodología de trabajo de un sistema complejo proviene de tres fuentes según Rolando García. El autor señala, en primer lugar, “el objeto de estudio, es decir, el sistema complejo (por ejemplo, un sistema ambiental) fuente de una problemática no reducible a la simple yuxtaposición de situaciones o fenómenos que pertenezcan al dominio exclusivo de una disciplina; el marco conceptual desde el cual se aborda el objeto de estudio y, por último, los estudios disciplinarios que corresponden a aquellos aspectos o recortes de esa realidad compleja, visualizados desde una disciplina específica” (García, 2011; p.93).

Se considera entonces que en el estudio de los problemas espaciales urbanos se debe pensar en los procesos transversales (políticos, económicos, institucionales,



sociales y ambientales) que explican el problema y permiten interpretar cada una de sus variables de análisis y los impactos que generan en el territorio.

Este abordaje permite obtener un diagnóstico integrado para proponer acciones concretas y políticas de intervención orientadas a las propiedades del sistema, por ejemplo, a su vulnerabilidad y resiliencia; y a su evolución, pensando en los procesos temporales y su dinámica de cambio a diferentes escalas.

Como se señaló anteriormente el estudio de la complejidad radica en el trabajo interdisciplinario donde las relaciones que determinan la estructura del sistema no se descubren sobre estudios disciplinarios parciales o sectoriales, sino que deben plantearse desde el inicio y se continúan elaborando y replanteando a través de toda la investigación (García; 2006). Desde este paradigma es un desafío que involucra las siguientes fases:

1. Reconocimiento general del problema. Formulación de las preguntas de base.
2. Análisis de estudios anteriores realizados sobre aspectos diversos de dicha problemática.
3. Identificación de elementos y relaciones para caracterizar un sistema aproximado a nuestro problema y sus condiciones de contorno.
4. Planteo de hipótesis de trabajo que permitirían explicar el comportamiento del sistema (funciones y funcionamiento de los subsistemas dentro del sistema total).
5. Identificación de la problemática a investigar en cada subsistema para verificar o refutar las hipótesis sobre sus funciones dentro del sistema.
6. Investigaciones disciplinarias de los problemas referidos (relaciones entre los subsistemas).
7. Primera integración de los resultados obtenidos (redefinición del sistema original planteado y reformulación de las preguntas iniciales).
8. Repetición de las fases 5 y 6 en relación con la nueva definición del sistema.
9. Segunda integración de resultados y nueva redefinición del sistema.
10. Repetición sucesiva de las fases 8 y 9 tantas veces como sea necesario hasta llegar a una explicación coherente que dé cuenta de todos los hechos observados y responda a las preguntas que han ido surgiendo en el proceso descrito.



Mediante estas fases podemos afirmar que “el objetivo de la investigación interdisciplinaria se logra a través del juego dialéctico en las fases de diferenciación e integración que tienen lugar en el proceso que conduce a la definición y estudio de un sistema complejo” (García; 2006. p.101). Este juego dialéctico de las fases da cuenta de que el sistema es dinámico y su estabilidad temporal, ya que cuando alguna de sus variables o parámetros se altera o es perturbado por condiciones externas, el sistema se reestructura y se reorganiza, conformando un nuevo orden, adquiriendo una nueva estructura.

“El análisis de las interrelaciones que se dan en un sistema complejo ocurre entre los procesos que determinan su funcionamiento. La inter-disciplinarietà surgirá como un subproducto de dicho análisis” (García; 2011. p.72).

1.2.2 Complejidad, geografía y riesgo en las ciudades

La concepción y el abordaje sobre la construcción y gestión de riesgos ha ido evolucionando a lo largo de las últimas tres décadas. Tradicionalmente se le otorgaba un papel central a la causalidad dada por los fenómenos naturales, pero más tarde, los estudios comenzaron a incorporar a la sociedad como actor central en la construcción del riesgo, en los procesos y las acciones que generan impactos latentes en la dinámica sociedad-naturaleza. Esta perspectiva crítica que hace énfasis en la intervención y las acciones de la sociedad que se materializan y transforman el territorio conlleva a pensar que el concepto de riesgo no es unidimensional. Perry y Montiel (1996) sostienen que abordado de esta manera lo convierte en una dificultad teórica para las disciplinas negando su multidimensionalidad y el aporte que puede darle la pluralidad de disciplinas para su estudio. En esta línea buscar marcos conceptuales y metodológicos que permitan entender estos procesos y reducir o mitigar los impactos en el espacio urbano es el gran desafío. Aquí radica la importancia del aporte derivado de la teoría de los sistemas complejos para la comprensión del riesgo en las ciudades.

La geografía como ciencia aplicada en el estudio de los procesos espaciales urbanos intenta brindar respuestas poniendo su centro en la organización del territorio. Según Gustavo Buzai (2015a y 2015b) las etapas que pueden verse en el desarrollo de la Geografía Aplicada se encuentran fuertemente vinculadas al desarrollo conceptual de la Geografía como ciencia. A finales del siglo XIX (1900-1950) centralizándose en la



región y los cambios de usos del suelo; a mediados del siglo XX (1950-1970) apoyándose en la Geografía Cuantitativa que le brindó una perspectiva nomotética a partir del uso de modelos y leyes científicas; en 1970-1980 iniciando una apertura multidisciplinaria en las temáticas de interés y a finales del siglo XX (1980-2000) apoyada claramente en la construcción de la Geografía Automatizada.

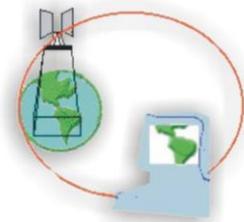
“Actualmente la Geografía Aplicada vive un importante auge al recibir un apoyo geotecnológico que vincula los más logrados desarrollos en cartografía y percepción remota, junto al tratamiento estadístico del análisis multivariado” (Buzai, 2016; p. 17). Ello permite generar herramientas para su focalización en los principios que guían la dimensión espacial (localización, distribución, asociación, interacción y evolución), y los aspectos conceptuales que sustentan diferentes niveles de análisis e intervención basados en la organización espacial del territorio.

“La Geografía Aplicada actual muestra su mayor eficiencia a través del ordenamiento territorial, directamente a través de la planificación y en apoyo a la gestión” (Buzai, 2016: p. 26 y Buzai, 2017).

Dentro de las ciudades, los procesos de ocupación y transformación del espacio nos permiten entender el modelo de desarrollo existente en las áreas urbanas y la falta de una lógica coherente con las premisas del desarrollo sustentable. 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, reducción de áreas verdes, alteración del sistema hidrológico e hidráulico que derivan en modificaciones del drenaje superficial por construcción de obras de infraestructura, rellenos, canalizaciones y entubados, baja accesibilidad a la disponibilidad de servicios, entre las más importantes.

Las políticas de intervención y acción en la planificación y gestión territorial determinan las condiciones de riesgo latentes en áreas urbanas y nos invita a pensar en la construcción de ciudades sustentables reduciendo y mitigando los impactos propios de un modelo de desarrollo que prioriza la construcción de un espacio dinámico, productivista e integrado sin tener en cuenta los costos ambientales que ello genera.

Adentrándonos al concepto de riesgo y considerando el sustento otorgado por el recorrido bibliográfico inter e intradisciplinar (Caputo y Herzer, 1987; Herzer, 1990; Natenzon 1995; Maldonado, 2013; Pereyra, 2014; Carballo y Goldberg, 2014; González



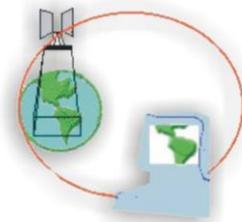
et al., 2015) el término es entendido como la probabilidad de que un fenómeno se desarrolle o no, partiendo de una ecuación en la que existen dos componentes: una amenaza o peligro y una vulnerabilidad o exposición a ese fenómeno ocasionando o no un desastre.

Para Cardona (2001), el riesgo adquiere sentido cuando existe una probabilidad de ocurrencia o cuando se prevea, teniendo en cuenta las condiciones de vulnerabilidad. Es una medida de probabilidad que excede un nivel de consecuencias sociales, económicas o técnicas en un cierto sitio y un período de tiempo. Es decir, no sólo dependerá de la posibilidad de que se presenten eventos, sino de las condiciones de vulnerabilidad que faciliten que se desencadenen consecuencias o impactos en la comunidad. Siguiendo al autor, los desastres son eventos socio-ambientales cuya materialización es el resultado de una construcción social.

Hagget (1994) diferencia dos tipos de riesgos: aquellos físico-naturales y aquellos en los cuales interviene la sociedad que ocasiona el desastre. Lo que separa uno de otro es la capacidad que la sociedad tiene para adaptarse o no a la incertidumbre que plantea el sistema físico-natural, su capacidad de carga o soporte físico. Aquí encontramos varios conceptos de importancia como lo son el de resiliencia/adaptación, capacidad de carga e incertidumbre. Esta conceptualización suma al aporte que plantea Natenzon (1998) refiriéndose a la responsabilidad del sistema político institucional y los diferentes actores implicados en la construcción de riesgo de desastre, dado su papel de agentes tomadores de decisión para el desarrollo de políticas públicas para la gestión integral del riesgo. Se convierten en un juego dialéctico en el paradigma de la complejidad que permite analizar y estudiar los procesos políticos, económicos y sociales que impactan en el sistema natural a diferentes escalas.

Según el aporte de diversos autores debemos diferenciar el concepto de riesgo y desastre. Muchas veces los fenómenos naturales no siempre se traducen en desastres, pero determinan condiciones de riesgo. Pereyra (2014) entiende el desastre como una situación de crisis o estrés social, resultado de la combinación entre una amenaza y ciertas condiciones de vulnerabilidad en la que la materialización del riesgo detona en desastre. Las características como tipo de fenómeno y magnitud dimensionan las condiciones de peligrosidad del mismo.

En definitiva, si fuésemos capaces de entender cómo funciona el sistema ambiental y la naturaleza reduciríamos gran parte de los impactos que acontecen en el territorio.



Sin amenaza, sin fenómeno detonante factible, y sin población vulnerable y/o expuesta al peligro, no habría riesgo y mucho menos, desastres.

1.3 Procesos físicos y urbanos como factores de riesgo en áreas urbanas

El aporte teórico y metodológico que nos brinda entender la realidad como un sistema complejo, el territorio, con la determinación de sus subsistemas y niveles de análisis implica desagregar cuales procesos se definirían como factores de riesgo en las ciudades. Para que ese riesgo exista es necesario evaluar las variables que conjugan las dimensiones de amenaza y vulnerabilidad y que, a partir de ellas, estudiemos el sistema en su totalidad para que mediante la Geografía Aplicada podamos elaborar modelos de análisis y de interpretación. Los resultados de estas abstracciones, que no resultan sino de la realidad misma y su escala de abordaje, constituyen un gran aporte para mitigar impactos, monitorear eventos en base a escenarios y establecer políticas preventivas, de gestión y planificación dentro del subsistema jurídico o político institucional.

Según se expuso en anteriores secciones los enfoques de riesgo no se limitan solo a pensar en las amenazas restringiendo su análisis a la perspectiva que hace predominar el conocimiento natural o tecnológico (Herzer et al., 2002). El concepto de desastre es una categoría social y el de riesgo es esa probabilidad de ocurrencia para el desarrollo del desastre. Por estas razones, interesa indagar los procesos sociales que inciden y se conjugan con los desencadenantes naturales o tecnológicos, para generar un desastre.

Distintos autores británicos y estadounidenses, entre ellos, el geógrafo Peter Haggett (1994) afirma que los riesgos ocurren en muchas áreas que experimentan cambios sociales y ambientales a lo largo del tiempo configurando patrones que se identifican en los eventos.

En América Latina, Herzer (1990); Renn (1992); Perry y Montiel (1996); Natenzon (1995; 1998) y Herzer (2011) consideran que las variables del riesgo según el tipo de fenómeno se miden por la magnitud (intensidad), el tiempo (frecuencia, duración, velocidad) y su geografía (extensión y concentración o dispersión espacial).

Es importante para el estudio de riesgos calcular un período de retorno, es decir, el intervalo medio dentro del que un evento de una magnitud específica puede esperarse



que ocurra. Así los conceptos de Amenaza, Peligrosidad, Vulnerabilidad y Exposición constituyen visiones parciales que coexisten en forma permanente en el análisis de riesgos y desastres y, cada una de ellas, vincula a agentes y actores sociales diferentes. Cualquier tipo de abordaje requiere trabajar con las cuatro visiones considerando el antes, durante y después del evento.

En síntesis, “los desastres ya no se conciben como sucesos geofísicos aislados, singulares y extremos, sino que son manifestaciones de un proceso social continuo que impacta en las condiciones de la vida cotidiana de una sociedad” (Herzer et al., 2002; p. 3). Comienza así a perfilarse un enfoque más integral, que analiza al desastre no sólo como producto sino también como proceso creando las condiciones de riesgo a través del tiempo.

Ahora bien, para estudiar las condiciones de riesgo en las ciudades se deben analizar las características principales que definen los regímenes climáticos y pluviométricos dados por la alternancia de períodos de sequía y períodos húmedos en la región de estudio con el objetivo de establecer asociaciones en las dimensiones e indicadores factores de riesgo.

Aliaga et al., (2016) considera que la dinámica de los recursos hídricos en áreas de llanura se relaciona directamente con la regularidad, intensidad y frecuencia de las precipitaciones. Citando a Zhao et al., (2012), “el conocimiento de eventos extremos de precipitación es relevante para orientar las políticas de ordenamiento del territorio referidas a obras de infraestructura y a diversas actividades económicas que deben ajustarse a las condiciones pluviométricas como lo son la agricultura, ganadería y turismo” (Aliaga et al., 2012; p.262).

“La región pampeana ha experimentado durante el último cuarto del siglo XX un corrimiento de las isoyetas anuales de 500, 750 y 1000 mm hacia el O de la provincia de Buenos Aires en sintonía con el avance de la frontera agropecuaria penetrando en zonas que durante las décadas precedentes habían sido predominantemente ganaderas y con poca aptitud para la producción de cultivos de cosecha debido a su clima semiárido” (Sierra y Pérez, 2006; p.4).

Pérez et al., (2015) señala que las precipitaciones anuales dentro de las cinco subregiones de la Región Pampeana Argentina (Ondulada, Central, Mesopotamia, Inundable y Sur) para el período 1941 a 2010 tienen un ciclo hídrico de largo plazo con fases húmedas y secas separadas por períodos de transición durante los cuales la



frontera agrícola avanza o retrocede. Existen muchos trabajos que sostienen este suceso y son aplicados para explicar los cambios en el sistema agroecológico, la productividad agropecuaria, los cambios en las coberturas de la tierra y la calidad ambiental de la región con el fin de prevenir los efectos adversos de las inundaciones, sequías, erosión, etc.

Algunos estudios citados por los autores mencionan que el incremento de las precipitaciones sería de carácter permanente debido al cambio climático cuyos efectos estarían incrementando el régimen térmico del país. No obstante, podría no serlo dado que puede deberse a la posibilidad de que la Región Pampeana manifieste un ciclo de larga duración (Sierra y Pérez; 2006). Es decir sugieren que podría existir un ciclo hídrico de larga duración con fases húmedas y secas, separadas por fases de transición, durante las cuales la frontera de la agricultura avanza o retrocede.

Si bien este análisis se realiza desde los sistemas agroecológicos, la variabilidad del régimen hídrico, la aptitud de los suelos y su capacidad productiva es interesante determinar el origen de los eventos hidrometeorológicos extremos, su duración, frecuencia, intensidad, magnitud y recurrencia. Según Bohn et al., (2011) las características del terreno y las variaciones del régimen de precipitación suelen modificar las redes hidrológicas provocando alteraciones en el uso del suelo así como también en el desarrollo de las actividades económicas. El análisis de dichas variaciones contribuye a la previsión de la ocurrencia de eventos extremos que pueden traducirse en inundaciones o sequías asociadas a los efectos de El Niño, la Niña y la Oscilación del Sur en el Sur de Sudamérica (ENSO).

Fuschini Mejia (1998) considera que en la llanura pampeana las inundaciones pueden clasificarse en inundaciones por desborde, por anegamiento y mixtas. En muchas zonas, las características geomorfológicas del territorio provocan que las planicies sean el escenario del desborde de los cursos de agua que, en épocas de excedentes, producen inundaciones hacia áreas laterales, fenómenos conocidos como almacenamiento lateral, que puede cubrir campos y tener lento movimiento. Las inundaciones por anegamiento se desarrollan en áreas sin pendiente en las cuales el agua queda estancada por periodos de tiempo, según la magnitud del evento y por último, las mixtas ocurren por la combinación de ambas, por desborde y anegamiento.

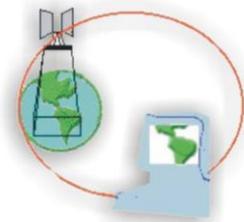
Pereyra (1999) destaca que las inundaciones pueden ser aguas arriba (*upstream floods*), producto de intensas precipitaciones en cortos periodos de tiempo en zonas de



pendiente alta o zonas montañosas y las inundaciones aguas abajo (*downstream floods*) consecuencia de tormentas de larga duración en grandes extensiones, propias de ambientes de baja pendiente o zonas llanas. En estas aparecen las inundaciones repentinas (*flashfloods*), propias de la rapidez con la que acontecen. Según la autora en muchas ocasiones se contempla la dinámica natural del área y de la cuenca, obviando los procesos de valoración y uso del territorio, altamente vulnerable. Además no se reflexiona sobre las transformaciones en la cuenca mediante la construcción de canales y otras obras que modifican el comportamiento y dinámica del sistema.

Las inundaciones y los anegamientos según Ferrando (2006) se diferencian por la implicancia que tienen a nivel de la planificación y el ordenamiento territorial. Las inundaciones son una consecuencia derivada de los procesos de recurrencia interanual, una forma de desequilibrio que se manifiesta en un momento, lugar y situación dada, entre el volumen hídrico a evacuar en una determinada parcela de tiempo y la capacidad de evacuación de los cauces o sistemas de drenaje. Mientras que los anegamientos se definen como la acumulación temporal de aguas lluvias en una determinada porción de territorio. En ese sentido también constituye una situación de desbalance, dado entre el volumen de la lluvia precipitada en un determinado lapso de tiempo y la capacidad de evacuación de un suelo, tanto horizontal como verticalmente. La capacidad de absorción de los suelos deriva de los cambios de su permeabilidad, su saturación y la topografía de su superficie, ya sean por causas naturales o artificiales. “Es decir si un suelo supera su capacidad de infiltración y evacuación subterránea de las aguas, lo cual es común que ocurra cuando las lluvias son intensas, se generará un excedente pluviométrico que deberá permanecer en superficie por el lapso de tiempo post-lluvia necesario para que la situación se normalice en forma de escurrimiento laminar, lagunas o simplemente agua estancada” (Ferrando. 2006; p. 27).

Más allá de diferenciar las inundaciones de los anegamientos, la recurrencia de las crecidas que presenta una cuenca urbana depende de los regímenes secos y húmedos analizados a través del tiempo en zonas de llanura y de su subsistema ambiental integrado por las características morfométricas como su topografía, pendiente, superficie de la cuenca, red hídrica y su capacidad de retención que influyen en la torrencialidad, la velocidad de respuesta, el tiempo de concentración y el volumen de los caudales. La configuración del terreno crea desniveles y obstáculos al



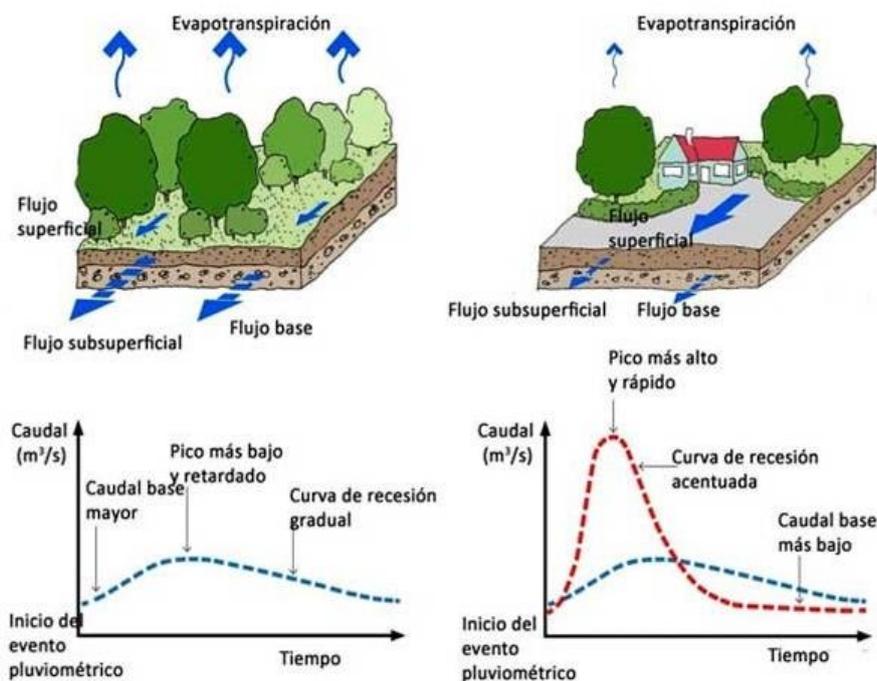
libre proceso de escorrentía superficial. Esto ocurre tanto en áreas rurales como urbanas que impiden que el agua circule libremente sobre el terreno siguiendo las líneas de pendiente. Es necesario aclarar que sobre áreas urbanas las propias obras de infraestructura urbana se comportan como vías de escurrimiento (vías principales y secundarias, líneas férreas, terraplenes, entre otras) por la insuficiencia de alcantarillas y pluviales provocando, por un lado, el drenaje del agua de lluvia, pero por otro ocasionando tanto lagunas aguas arriba y agua estancada en lugares más bajos, debido a la concentración de las construcciones que no permiten que el agua circule ni se infiltre. Los eventos hidrometeorológicos extremos forman parte de la amenaza y constituyen el subsistema natural o físico sobre el cual se desarrollan determinados procesos que vinculan el ciclo hidrológico en interacción con el subsistema social: el proceso de urbanización, expansión urbana y el medio construido.

Tucci (2007) describe detalladamente las alteraciones que el desarrollo urbano produce al ciclo hidrológico. En términos resumidos constaría de la siguiente secuencia: “ la reducción de la infiltración del suelo provoca que el volumen de agua que no infiltra permanezca en la superficie, acelerando la escorrentía superficial y reduciendo el tiempo de desplazamiento; por la reducción de la infiltración, el acuífero tiende a disminuir el nivel del nivel freático (especialmente cuando el área urbana es muy extensa) reduciendo el flujo subterráneo; y finalmente, dada la sustitución de la cobertura natural por zonas impermeables, existe una reducción de la evapotranspiración, ya que la superficie urbana no retiene agua como la cubierta vegetal y no permite la evapotranspiración como ocurre por el follaje y el suelo” (Tucci, 2007; p.88). El autor enfatiza que este proceso de alteración del ciclo hidrológico, y posterior anegamiento, es sensible también a la falta de control del espacio urbano e infraestructura hídrica, compuesta esencialmente por sistemas de abastecimiento de agua, alcantarillado sanitario, red de desagüe pluvial y tratamiento de residuos sólidos.

Si analizamos la figura n°1 extraída de Abellán (2016) se puede observar como la urbanización conlleva a una disminución de la infiltración, a una reducción y/o eliminación de los espacios verdes que interceptan el agua de lluvia y promueve la evapotranspiración y a la desaparición de rugosidades en el suelo debido a la pavimentación impidiendo almacenar el agua precipitada.



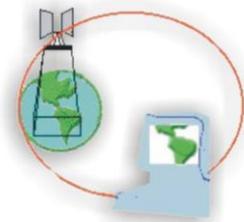
Figura n°1. Los impactos de la urbanización en el ciclo del agua



Fuente: Abellán. (2016)

Este desbalance de la hidrología superficial impacta en la cuenca hidrográfica como consecuencia de un aumento de los caudales, crecidas, anegamientos e inundaciones que derivan en un mayor costo de tiempo de drenaje por el volumen de escurrimiento.

La demanda de infraestructura urbana y el aumento de la superficie edificada como las densidades de población, características propias del medio construido, definen otros factores de riesgo. Áreas urbanas densificadas que cuentan con mayor equipamiento colectivo están mejor preparadas ante un evento imprevisto que aquellas zonas que no poseen infraestructura suficiente, como pavimento, red de drenaje pluvial y de alcantarillado y obras hidráulicas, lo cual, las posiciona en una situación de fragmentación y segregación en cuanto a los conceptos de sostenibilidad, equidad y justicia espacial. Sin embargo, las áreas urbanas con mayor concentración de población requieren de planes de acción y contingencia, ya que evidencian graves problemas en



el drenaje natural de la escorrentía, en el tiempo de retardo del escurrimiento y la insuficiente capacidad de carga de los colectores pluviales.

La impermeabilidad de los suelos también se ve afectada por el régimen de usos y coberturas en áreas urbanas y rurales, como por la gran producción de residuos de diferente naturaleza depositados sobre la superficie de las cuencas urbanas. Tucci (2007) señala que las inundaciones de tipo local dadas en cuencas pequeñas ($< 100 \text{ km}^2$, y muy frecuentemente cuencas $< 10 \text{ km}^2$) a medida que la ciudad se urbaniza genera los siguientes impactos:

- “Aumento de los caudales máximos y de su frecuencia debido al aumento de la capacidad de escurrimiento a través de conductos y canales e impermeabilización de las superficies;
- Aumento de la producción de sedimentos debido a falta de protección de las superficies y la producción de residuos sólidos (basura);
- Deterioro de la calidad del agua superficial y subterránea, debido al lavado de las calles, transporte de material sólido y de las ligaciones clandestinas de flujos cloacales y pluviales;
- Desorganización del implemento de la infraestructura urbana, tales como: (a) puentes y taludes de calles que obstruyen el escurrimiento; (b) reducción de sección del escurrimiento por rellenos en los puentes y para construcciones en general; (c) deposición y obstrucción de ríos; canales y conductos por basuras y sedimentos; (d) proyectos y obras de drenaje inadecuados, con diámetros que disminuyen hacia aguas abajo, drenaje sin escurrimiento, entre otros” (Tucci, 2007; p.28-29).

Un factor de riesgo importante a analizar dentro del proceso de expansión urbana que no involucra su estudio en esta etapa de la investigación es la combinación de redes de servicios. La infraestructura de cloacas puede ser combinada (flujos cloacales y pluviales en un mismo conducto) o separada (red pluvial y sanitaria separadas). La legislación establece el sistema separador, pero en la práctica esto no ocurre debido a las conexiones clandestinas y a la falta de red cloacal. Debido a la falta de capacidad financiera para la construcción de la red cloacal, algunos municipios han permitido el uso de la red pluvial para transporte de las cloacas, lo que puede ser una solución inadecuada si el flujo no posee tratamiento. Cuando finalmente se logra



implementar el sistema cloacal, la gran dificultad que se presenta es el retiro de las conexiones pluviales y el objetivo de querer separar dos sistemas con diferentes niveles de carga (Tucci, 2007; p. 30).

Para concluir los subsistemas que restan mencionar y que garantizan la estructura y funcionamiento del sistema en su totalidad es el subsistema político y económico, a partir de los cuales, se generan las presiones, relaciones de poder y contradicciones en el espacio urbano bajo las lógicas del mercado, la búsqueda de rentabilidad en detrimento de la sostenibilidad ambiental. El primero de ellos organiza el territorio mediante la aplicación y ejecución de políticas de gestión y planificación derivadas no sólo del desarrollo de obras e infraestructuras para mitigar impactos aguas arriba o abajo, sino también del regular los usos de suelo mediante el código de edificación o zonificación plasmados en su plan de desarrollo territorial. El segundo se alimenta del primero ejerciendo una puja de intereses entre los agentes y actores sociales dado por la especulación inmobiliaria y la búsqueda de una rentabilidad inmediata. Ejemplos de ello lo encontramos en el avance de la construcción en zonas con restricciones de uso, no compatibles con el código de edificación y alterando el paisaje natural, la dinámica hidrológica y ambiental de las ciudades; el desarrollo de urbanizaciones especiales que llevan a modificar su zonificación y los convenios urbanísticos y excepciones con el objetivo de lograr la dinamización de zonas para tener mayor atractivo turístico o para el consumo de las clases más altas.

1.4 Modelización hidrológico-hidráulica y análisis espacial del riesgo de inundaciones urbanas

Este apartado intenta recopilar los principales antecedentes en modelización y análisis del riesgo en áreas urbanas para evaluar, prever, predecir y mitigar impactos en zonas potencialmente anegadas y/o inundables. Es necesario destacar que mucha bibliografía enfoca sus estudios desde la teoría social del riesgo, mientras que otros trabajos lo hacen desde el abordaje de la complejidad. Asimismo ocurre con la mirada del problema basada desde una de las dimensiones de la categoría de riesgo: la amenaza o vulnerabilidad; desde la peligrosidad o la exposición; desde los subsistemas involucrados y sus políticas de intervención, gestión y actuación. Finalmente también se encontraron estudios basados en la incertidumbre, haciendo énfasis en la predicción de

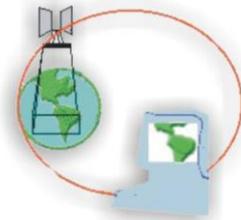


escenarios, en los sistemas de alerta y prevención y en el desarrollo de medidas, planes de emergencia y políticas de acción. En todos los casos, ninguno de los trabajos invalida el objetivo de esta investigación y todos son clave para analizar cada punto de vista de la problemática.

Sin embargo de la vasta bibliografía consultada resulta imprescindible un abordaje interdisciplinario contemplando, por un lado, los aportes provenientes de las ciencias sociales que potencian los trabajos de diagnóstico ambiental estudiando el sistema hidrológico y su red de drenaje, poniendo su centro en la exposición y condiciones de vulnerabilidad social para diagramar políticas públicas y, por otro, los avances provenientes de las ciencias exactas, como las ciencias de la ingeniería, física, agrimensura e hidráulica que enfocan sus análisis en determinar, evaluar y predecir cómo se comporta la dinámica del escurrimiento en los sistemas de cuenca ante el establecimiento de parámetros e indicadores de simulación espacial. Aquí entran en escena los modelos hidrológicos predictivos a diferentes escalas, la configuración de las variables de entrada, su peso, la variabilidad de los indicadores a medir y los resultados obtenidos.

El aporte de las geotecnologías al análisis del riesgo de inundaciones en áreas urbanas tiene como principal objetivo la gestión, planificación y monitoreo del territorio desde el campo de la geografía aplicada. Es decir, analizar la relación sociedad-naturaleza y su complejidad para la construcción de ciudades sostenibles. Los trabajos más afines a nuestra disciplina están vinculados a estudios de riesgo. Estas investigaciones refieren al diagnóstico del sistema natural histórico y actual de las ciudades, a su vulnerabilidad y a la elaboración de mapas de riesgo hídrico para generar estrategias de intervención respecto a su posterior mitigación, gestión y evaluación. El estudio de la historicidad y temporalidad de los eventos junto a los impactos e implicancias a diferentes escalas es lo que prima en la mayoría de las investigaciones. Es por ello que se intenta integrar las variables diagnóstico del sistema hidrológico ambiental y urbano aplicando geotecnologías para el desarrollo de modelos predictivos, monitoreo y mitigación de inundaciones a fin de dar respuesta y tomar decisiones en el desarrollo de políticas públicas que eviten los problemas de anegamiento en ciudades medias bonaerenses.

Teniendo en cuenta el recorrido bibliográfico podemos citar algunos antecedentes que provienen de ambos aportes disciplinares y que se enmarcan desde

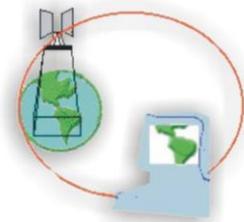


aplicaciones internacionales, regionales y locales. Cada trabajo posee potencialidades desde las dimensiones y variables de análisis seleccionadas, las escalas de trabajo utilizadas y su variedad en el uso de las geotecnologías para abordar el problema.

El trabajo de los geógrafos Dapeng y Coulthard (2015) de la Universidad de Loughborough de Reino Unido denominado *“Evaluating the importance of catchment hydrological parameters for urban surface water flood modelling using a simple hydroinundation model”* hace énfasis en la utilización de un modelo de hidroyundación (*FloodMap-HydroInundation2D*) para investigar los parámetros hidrológicos de captación en inundaciones de aguas superficiales urbanas a partir de la evaluación del balance hídrico midiendo la infiltración, la evapotranspiración la precipitación y la capacidad de drenaje. Su enfoque se basó en escenarios a partir del evento ocurrido en junio de 2007 en Kingston Upon Hull, Reino Unido. El levantamiento topográfico se basó en la obtención de datos Light Detection And Ranging (LIDAR) de alta resolución (1 m) con una precisión vertical de 25 cm aproximadamente y 15 cm en áreas más bajas. Para la modelización se obtuvieron dos Modelos Digitales del Terreno (DTM) de dos resoluciones (10 m y 20 m) para probar su sensibilidad. Luego del análisis de sensibilidad del modelo y la calibración, las simulaciones fueron ajustadas considerando la mejora de las capacidades de drenaje y almacenamiento de tierras urbanas y rurales.

Los resultados sugieren que el modelo es sensible al parámetro hidrológico clave de la conductividad hidráulica del suelo como la sensibilidad de la resolución de la malla, la parametrización de la rugosidad (variación del valor n de Manning), la tasa de infiltración y el almacenamiento de agua. La mejora de la capacidad de drenaje y almacenamiento en el área rural aguas arriba puede aliviar el alcance y la magnitud de las inundaciones en el área urbana aguas abajo. Este estudio destaca que, en algunos entornos, el modelado de inundaciones de aguas superficiales urbanas está tan fuertemente controlado por factores rurales (por ejemplo, la tasa de infiltración y el almacenamiento de agua) como por parámetros internos del modelo, como la rugosidad y la resolución de la malla, siendo necesario no solo trabajar con la importancia de la parametrización interna del modelo sino también con los procesos hidrológicos determinados por fuera de la cuenca de estudio con el fin de obtener resultados más confiables en las modelizaciones.

El segundo conjunto de antecedentes provienen del campo de la ingeniería civil, hidráulica y la gestión de recursos hídricos. El aporte del trabajo del equipo de



investigación Alemán (GeoForschungsZentrum, GFZ, Potsdam) Merz et al., (2007) denominado "*Flood Risk Mapping at the Local Scale: Concepts and Challenges*" señala la importancia de trabajar con cartografía para el análisis de la distribución espacial del riesgo de inundaciones. Los mapas son valiosos para presentar y evaluar la situación local de las inundaciones y brindan información para muchas aplicaciones en la defensa contra inundaciones y la gestión de desastres. La intensidad y la probabilidad de excesos se combinan para cuantificar el peligro, expresado en niveles de peligro.

Sin embargo los autores dan cuenta que en Europa no existe una nomenclatura estandarizada o prácticas acordadas para el mapeo de inundaciones. La mayoría de los enfoques de mapeo son limitados para identificar áreas inundadas para ciertos escenarios de inundación, especialmente una inundación de 100 años. Los análisis que incluyen información sobre pérdidas por inundaciones se limitan a daños económicos. Otros tipos de pérdidas, por ejemplo, daños a personas o al entorno son raramente mapeados. En algunos casos existe información adicional sobre la intensidad del proceso, como la variable de profundidad del agua. De todas maneras los mapas que ilustran las posibles consecuencias de inundaciones o la información que ayuda a mitigar los daños por inundaciones es escasa. Por ello este trabajo intenta revisar los conceptos de mapeo del riesgo de inundación a escala local, discutir los desafíos y finalmente proponer una presentación sistemática de los peligros de inundación, las vulnerabilidades y los riesgos, que abarcan desde los mapas de peligro de inundación hasta los mapas de riesgo de daño. Como se muestra en la figura n°2, la intensidad es uno de los factores de los que dependen los impactos y el peligro debe cuantificar la intensidad del proceso que va más allá de una curva de frecuencia de inundación. Para ello los indicadores de medición son la profundidad del agua y la velocidad del flujo para el grado de afectación del medio construido, entorno natural y la infraestructura urbana. En el caso del peligro humano el indicador más adecuado resulta del producto de la velocidad del flujo y la profundidad del agua.

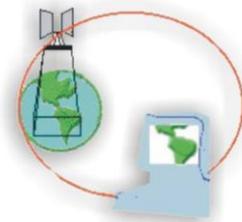
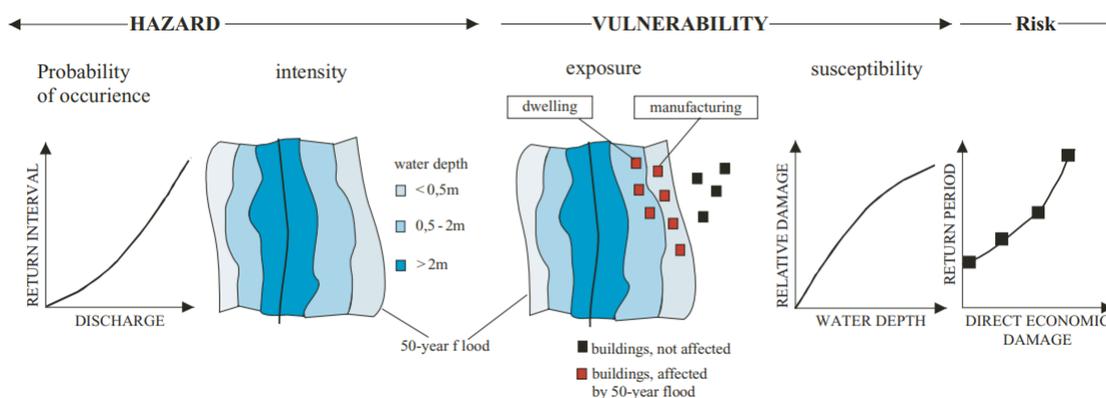


Figura n°2. Riesgo de inundación como interacción de la amenaza (probabilidad e intensidad) y la vulnerabilidad (exposición y susceptibilidad)

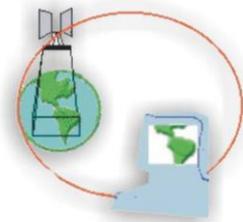


Fuente: Merz et al. (2007)

En cualquier caso la tasa de aumento del agua determina el tiempo disponible para la defensa contra inundaciones y está dada por la duración y el aumento de la velocidad de subida del agua.

Para medir la vulnerabilidad se compone de dos elementos, la exposición (o daño potencial) y (pérdida) susceptibilidad. La primera refiere al número o el valor de los elementos que están en riesgo y la segunda se describe mediante funciones de daño relativas en términos de daño monetario o características de los elementos dañados. Se puede complejizar los análisis si consideráramos la evaluación del riesgo no solo a partir del daño económico directo, sino también midiendo los efectos adversos sobre la población y las actividades económicas a largo plazo en la zona propensa a inundaciones.

Continuando con el recorrido bibliográfico García Navarro y Fernández Pato, representantes del equipo de Grupo de Hidrología Computacional (GHC) de la Universidad de Zaragoza (UNIZAR) en su estudio denominado "*Development of a New Simulation Tool Coupling a 2D Finite Volume Overland Flow Model and a Drainage Network Model*" (2018) desarrollan una herramienta de simulación que combina un modelo de flujo 2D y un modelo de red de drenaje. La simulación computacional de los procesos involucrados puede conducir a una mejor gestión de la red de drenaje de las áreas urbanas. El modelo de flujo superficial se basa en ecuaciones bidimensionales de aguas someras con las que es posible resolver la dinámica del agua superficial así como



la transformación de lluvia en escorrentía a través de diferentes submodelos de infiltración. El sistema de drenaje subterráneo asume mayormente un flujo superficial libre que puede presurizarse en situaciones específicas. La red de tuberías se modela mediante secciones unidimensionales acopladas al modelo de superficie en regiones específicas del dominio, como drenajes o alcantarillas. Dentro del dominio bidimensional en la superficie, esto conduce a distribuciones detalladas de resultados numéricos, como la profundidad del agua o la descarga del flujo. Esto es de especial relevancia en topografías de terrenos abruptos o en áreas urbanas donde los edificios condicionan dramáticamente la dirección del flujo.

El rendimiento de los modelos se evaluó utilizando datos experimentales de un caso de prueba de laboratorio coincidente en una región de aproximadamente 600 m del tramo urbano del río a través de la localidad de Fuentes de Ebro (Zaragoza, España) y los resultados proporcionados para diferentes escenarios se relacionaron con un caso de prueba de flujo urbano real. Para el modelado se determinaron coeficientes de rugosidad de Manning y regiones de infiltración.

El dominio de superficie 2D se discretizó utilizando una malla flexible triangular no estructurada de 29.600 celdas. La malla se refinó localmente cerca del canal principal y en el área entre los edificios. Las elevaciones del lecho se obtuvieron a partir de un DTM de 2 m x 2 m completado con 842 datos topográficos in situ.

Respecto a los resultados el uso de un modelo distribuido de superficie dinámico 2D completo permitió el acceso a información detallada sobre las distribuciones espaciales y la evolución temporal de la profundidad del agua, la velocidad, la tasa de infiltración o cualquier otra variable hidráulica/hidrológica. Bajo dos supuestos diferentes para las condiciones iniciales (lluvia intensa y evento de inundación), tanto los modelos de flujo superficial como los de alcantarillado predijeron la evolución instantánea de la profundidad del agua en ambos dominios (superficial y alcantarillado).

En definitiva este trabajo muestra que es posible adaptar modelos 2D de flujo superficial a redes de drenaje que pueden presurizarse localmente y concluir que el modelado hidrológico/hidráulico en ambientes urbanos se está convirtiendo en una herramienta relevante para predecir y evaluar los efectos de eventos de tormentas debido a la falla de los sistemas de alcantarillado.

Entre los aportes provenientes a escala regional podemos citar a Scioli (2009) de la UNR quien en su investigación *“Modelación del escurrimiento superficial en áreas de*



llanura: Implementación y calibración de un modelo distribuido de grilla”, estudia, analiza y evalúa el movimiento multidireccional del agua en terrenos de llanura considerando la poca aplicabilidad de los modelos hidrológicos clásicos para este tipo de relieves. En primer lugar porque el concepto de convergencia del flujo hacia una red de drenaje frecuentemente no es válido y, en segundo lugar, el escurrimiento en lámina generalmente es más que el encausado, pudiendo tomar caminos diferentes dependiendo de la altura del agua, por lo cual, el almacenamiento en áreas bajas del terreno es comparativamente alto. Se utilizaron dos metodologías, una con un modelo hidrológico y otra con un modelo hidrodinámico 1-D HEC-HMS/RAS.

El área de estudio comprendió la localidad de Orense dentro del partido de Tres Arroyos (Buenos Aires). Para la implementación de los modelos fue necesario contar con topografía digital, por lo que se utilizó cartografía del IGM y el modelo digital de elevación del SRTM de 90 m corregido altimétricamente con GPS diferencial y estos puntos con respecto al geode EGM 96 y también ajustando los errores derivados del truncamiento de decimales que genera desniveles entre celdas contiguas con diferente valor de cota. A esta información se agregaron datos de canales, caminos, usos de suelo etc. Las variables que definen la geometría del almacenamiento en las celdas y los parámetros hidráulicos como el coeficiente rugosidad, se estimaron a partir de las características físicas de la cuenca (topografía, suelos, vegetación, geología, etc.).

Los modelos HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) (HEC, 2006) acoplado al HEC-RAS (River Analysis System) (HEC, 2002) se utilizaron para representar el proceso precipitación-escorrentía y la propagación hidrodinámica de caudales en los canales.

El modelo distribuido de grilla utilizado fue Simulaciones Hidrológicas I (SSH-I) desarrollado en la Universidad del Rosario por Riccardi (2000) y Rentarúa y Stenta (2003) que permite evaluar la respuesta hidrológica en distintos sitios de la cuenca ante distintas condiciones hidrometeorológicas, de uso del suelo y de acciones de origen antrópico. A partir de su utilización se realizó un proceso de calibración basado en analizar la evolución del agua acumulada sobre el terreno contrastando de manera cualitativa los resultados del modelo distribuido con la visualización e interpretación de imágenes satelitales y observaciones de los pobladores de la zona. Con este análisis se evaluó la variación de la superficie y forma de las áreas de aporte a las secciones de salida de estos sistemas y la dirección del escurrimiento sobre el terreno. Finalmente el desarrollo del trabajo se orientó a la búsqueda de criterios y herramientas que pueden



servir de guía para la discusión y desarrollo de metodologías útiles para la calibración de modelos en estos sistemas.

Otra de las contribuciones regionales proviene del grupo de arquitectos y especialistas en ordenamiento territorial y desarrollo urbano, Piperno y Sierra de la Universidad de La República, Montevideo, Uruguay. El trabajo se titula “*Estrategias de intervención en áreas urbanas inundables: el caso Bella Unión, Uruguay*” (2013) y como objetivo persigue caracterizar y dar elementos para la acción en las áreas inundables de la ciudad de Bella Unión. Situada sobre la margen oriental del río Uruguay, es uno de los centros poblados con problemas de inundación recurrentes. Las inundaciones afectan fuertemente la economía local, impactando sobre sectores muy vulnerables de la población. El área inundable se ha visto incrementada a partir de 1979 por la puesta en funcionamiento de la represa de Salto Grande.

El trabajo desarrolla una metodología basada en el análisis de la interacción del sistema hídrico con el sistema territorial, que permite reconocer los distintos niveles de riesgo de la zona afectada y los impactos asociados, considerando tanto el nivel de la amenaza como la vulnerabilidad de sus pobladores. Para ello se territorializó la frecuencia de inundación según periodos de retorno, obtenidos sobre la base del modelo hidrodinámico; y la altura que alcanza el agua en el interior de la vivienda, ambos registrados a partir del trabajo de campo y de la altura de la vivienda en relación con la calle. Las fuentes, variables y dimensiones del relevamiento territorial para analizar las zonas más vulnerables del área de estudio permitieron integrar la información dentro de una infraestructura de datos espaciales y determinar para distintos períodos de retorno el grado de exposición y fragilidad social según la afectación de las inundaciones en el valor de los bienes inmuebles en suelo privado. De acuerdo a los autores, el monto de las pérdidas se clasifica en dos grandes ítems: la pérdida del valor del bien por su ubicación en área inundable, entendido como el impacto sobre el valor del barrio; y por otro lado, la afectación directa del evento sobre el predio y sobre el bien inmueble. El impacto sobre el valor del barrio se define a partir de la consideración de que hay factores que modifican el valor del bien sin que el agua toque siquiera el terreno. Entre ellos se destacan: su condición de predio en zona inundable; la accesibilidad al mismo, dificultada o imposibilitada al momento del evento; la pérdida de calidad ambiental durante el mismo, evidenciada por la invasión de animales desplazados por el agua de su hábitat natural, la presencia de olores, etcétera. El impacto sobre terreno y mejoras



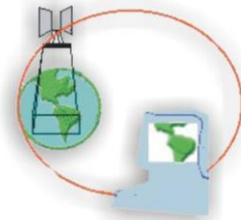
se refiere específicamente a la afectación del bien por el ingreso del agua al predio. El mismo se establece en función del periodo de retorno del evento para cada uno de los predios y de la altura a la que llega el agua. A partir de esto se definen rangos de afectación que se corresponden con valores de reparación, expresados en porcentaje del valor total de la mejora.

Como conclusiones de este estudio se resalta la falta de control de las zonas inundables luego de efectivizados los realojos, con la generación de nuevas ocupaciones posteriores; la relocalización de las familias en condiciones de hábitat incluso más precarias que las del área inundable; la pérdida de redes sociales y medios de subsistencia, que trae aparejados nuevos conflictos sociales y las expansiones urbanas innecesarias sobre suelo rural y muchas veces incluso en zonas de riesgo entre las más destacadas.

Desde la disciplina geográfica y recuperando los aportes de la Geografía Aplicada podemos mencionar como antecedente dentro de esta escala la investigación doctoral desarrollada por Principi de la Universidad Nacional de Luján (UNLu): *“Análisis socioespacial y modelización prospectiva del contexto de riesgo por inundaciones en la ciudad de Luján (Buenos Aires, Argentina) 2010-2030”* (2020) que enfoca el estudio del riesgo a partir de las desigualdades socioespaciales y desde las herramientas teórico metodológicas para su abordaje permitiendo comprender los fenómenos de origen natural y antrópico para enfrentar consecuencias adversas. La autora destaca el estudio de la realidad como sistema complejo requiriendo un análisis multidimensional de las variables que definen la problemática y pueden estudiarse desde una Geografía Aplicada.

La investigación se focaliza en el estudio de la dimensión espacial del riesgo a inundaciones en la ciudad de Luján (Buenos Aires, Argentina) en cuanto a su situación actual y perspectivas futuras. Se lo analiza desde un punto de vista sistémico con centralidad en el sistema socioespacial, en donde la relación sociedad-ambiente genera diferenciaciones areales en el ámbito urbano.

La modelización de la realidad permitió abordar espacialmente el riesgo a partir de relacionar el subsistema físico-natural representado por la amenaza de inundaciones determinada con procedimientos de simulación de niveles de agua, y el subsistema humano, a partir de la caracterización de la vulnerabilidad socioeconómica de la población considerando variables de índole social, económica, educativa y habitacional



integradas con la metodología de análisis multivariado Valor de Índice Medio (VIM). La determinación de diferentes niveles de riesgo a partir del modelado cartográfico permitió generar un panorama global ante un evento de inundación actual y su evolución futura a partir de modelar, mediante la utilización de autómatas celulares y redes neuronales artificiales, la expansión urbana hacia el año 2030.

Como resultado la identificación concreta de cuatro áreas consideradas prioritarias para la planificación urbana presentan los niveles de riesgo más elevados y una tendencia a expandirse sobre áreas con amenaza de inundación. Estos resultados se convierten en una herramienta fundamental en apoyo para la toma de decisiones espaciales en sectores específicos del área de estudio.

Por último los aportes bibliográficos a escala local estuvieron enmarcados en las potencialidades de modelos bidimensionales, el uso de drones, los análisis en software libre diversos y los enfoques desde la cartografía de peligro y riesgo. Entre ellos podemos mencionar los estudios de Collazos et al., (2018) del IHLLA de la UNCPBA denominado *“Modelo bidimensional de inundación urbana de la ciudad de Azul (Argentina) con herramientas de uso libre”* que fue contenido en esta escala por ser zonas de contigüidad geográfica con la ciudad de Tandil en lo que refiere a sus características de emplazamiento y situación según el reconocimiento de los subsistemas físico natural e hidrológico en ambos territorios.

La potencialidad de este trabajo radica en la metodología desarrollada para la construcción de un modelo digital de terreno (MDT) en el cauce del arroyo del Azul de la ciudad de Azul y el valle de inundación en el entorno urbano, verificando la aplicabilidad del software IBER² en zonas llanas a partir de la configuración de variables e ingreso de parámetros dentro del modelo. Para tal fin se emplearon exclusivamente herramientas de uso libre para tratar la información espacial y modelar el tránsito del agua que trae el arroyo y ocupa la trama urbana.

Profundizando en las características del software empleado y recuperando el aporte del trabajo de Ochoa García et al., (2016) de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba *“Evaluación de modelos hidrodinámicos para representar flujos en cauces naturales”* IBER es un modelo numérico bidimensional de simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen no-

² IBER es un modelo hidráulico bidimensional para la simulación del flujo superficial libre en ríos y estuarios.



permanente, y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial. El módulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad, también conocidas como *2D Shallow Water Equations* (2D-SWE) o ecuaciones de Saint Venant bidimensionales. Dichas ecuaciones asumen una distribución de presión hidrostática y una distribución relativamente uniforme de la velocidad en profundidad.

El rango de aplicación de IBER abarca la hidrodinámica fluvial, la simulación de rotura de presas, la evaluación de zonas inundables, el cálculo de transporte de sedimentos y el flujo de marea en estuarios. Este estudio se centró en el área del arroyo La Cañada, el cual, nace en la depresión tectónica de La Lagunilla y cruza la parte S de la ciudad de Córdoba, de SO a NE, para finalmente desaguar en el Suquía. En líneas generales ambos trabajos poseen aportes de gran importancia para el desarrollo de esta investigación pensando en la potencialidad de los modelos bidimensionales, aunque el segundo compara además de IBER, otras herramientas de uso libre como los modelos unidimensionales de HEC-RAS y el modelo tridimensional DELFT3D combinado con técnicas experimentales como la velocimetría por seguimiento de partículas *Particle Tracking Velocimetry* (PTV) donde se obtiene el campo de velocidades superficiales instantáneas del flujo (velocidades bidimensionales), con alta resolución temporal y espacial.

Retomando el estudio de Collazos et al., (2018) la obtención del MDT tuvo en cuenta:

- El cauce del arroyo donde se relevaron 27 secciones transversales, se interpolaron secciones intermedias y luego con Ras-Mapper se convirtió en un Modelo Digital del Terreno (MDT) con un pixel de 1 x 1 m.
- La zona urbana donde se relevaron mediante GPS diferencial de simple frecuencia más de 1600 puntos, de los cuales, se emplearon 550 que presentaban menor error y una distribución no redundante en el espacio.
- El terreno natural donde se utilizaron las cartas topográficas del Instituto Geográfico Nacional (IGN) para estimar algunos datos que complementan la zona no urbanizada hacia los bordes del dominio.

Finalmente estos tres MDT parciales se combinaron en un modelo único de 1x1 m para todo el dominio a modelar usando la herramienta RAS-Mapper de HEC-RAS 5.0.4 y se decidió incluir de forma simplificada y, a modo de ejemplo, estructuras hidráulicas como uno de los puentes existentes en el área de estudio para incorporar a la



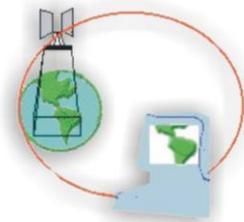
simulación. Luego en IBER se generó la malla TIN integrando la estructura hidráulica y variando el coeficiente de rugosidad (valor n de Manning) según una zonificación de rugosidades en el dominio (pavimento o asfalto, entoscado o tierra, cauce del arroyo, plazas, pradera o pastos cortos y arboledas) y la validación se realizó ejecutando el modelo con el hidrograma de la crecida de mayo de 2012.

Para concluir se han considerado los aspectos más relevantes en esta clase de modelos: la importancia de la información topográfica precisa, especialmente en zonas tan planas, el tamaño del mallado (adecuado para una buena representación y al mismo tiempo operativo en tiempos de cálculo), las condiciones de contorno, etc.; y se ha explorado el efecto y la sensibilidad de la rugosidad superficial y de las estructuras en las profundidades y velocidades resultantes. Estas aplicaciones llevadas a cabo bajo software libres integrando Quantum GIS (QGIS) como HEC-RAS e IBER son herramientas muy probadas y potentes para el análisis de los valores de profundidad y velocidad del flujo obtenidos para la ciudad de Azul y su importancia en el diseño de planes de evacuación y de mitigación de daños, así como para la planificación territorial del crecimiento urbano, minimizando este riesgo natural.

El trabajo de Rinaldi et al., (2019) del Instituto PLADEMA de la UNCPBA titulado “*Drone based DSM reconstruction for flood simulations in small areas: a pilot study*” destaca la necesidad de trabajar con modelos digitales de alta definición y detalle en áreas urbanas. Las técnicas de producción generalmente implican un compromiso entre coste, precisión, cobertura espacial y resolución. En este sentido, los modelos de superficie generados con software de fotogrametría basados en imágenes de vehículos aéreos no tripulados constituyen una herramienta de bajo costo y alta calidad para ello.

El software de fotogrametría *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) está compuesto esencialmente por dos herramientas de software, uno de control de misión planificado previamente como MAP, Drone Deploy o Pix4D Capture utilizados en este trabajo y el posterior procesamiento de imágenes en *Open Drone Map* (ODM), un conjunto de herramientas de código abierto para procesar imágenes aéreas devolviendo mediante imágenes aéreas georreferenciadas y puntos de control terrestre una densa nube de puntos, ortofotos y modelos de superficie digital.

El Modelo Digital de Superficie (DSM) obtenido de ODM fue una matriz 2D con una altura media relativa de cada celda (60 x 60 cm) que muestra la altura actual del césped, las carreteras, los edificios y los árboles. También se construyó una capa ráster



binaria con las dimensiones del DSM mediante QGIS para identificar celdas de canales. Luego, el algoritmo aplicó dos correcciones diferentes a las celdas de "canal" del DSM: la eliminación de obstrucciones y la disminución de altura. La eliminación de obstrucciones atraviesa todos los canales corrigiendo cualquier aumento de altura entre las celdas vecinas hacia abajo del canal. De esta manera todas las células del canal son reducidas por un valor dado, generalmente por la profundidad media estimada del canal.

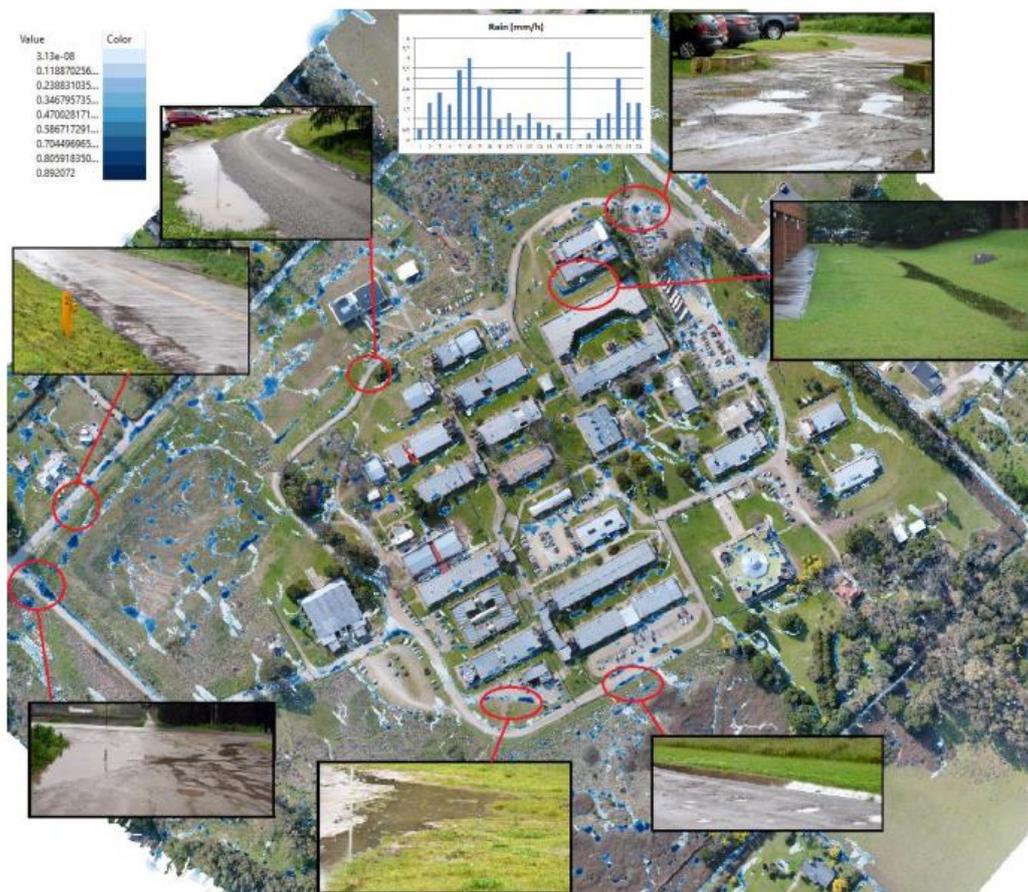
El modelo corregido se combinó con el AQUA, un modelo hidrológico basado en el paradigma de los autómatas celulares que simula el flujo de agua superficial natural mediante el seguimiento de las reservas de agua locales, la contabilidad de la precipitación, infiltración y flujos intercelulares.

El objetivo final fue detectar según la figura n°3 áreas anegadas y cursos naturales a partir del hietograma de eventos de lluvia de septiembre de 2018. El DSM podría mejorarse con *Ground Control Point* (GCP) para lograr una mayor precisión eliminando los árboles que el modelo reconstruye como una estructura sólida con el tamaño de la copa diseñada hacia el suelo impidiendo el flujo de agua por debajo.

El área de estudio de este estudio fue el Campus Universitario, inicialmente por la proximidad, lo que facilitó el vuelo del UAV, además de permitir un estudio local (a pie) de diferentes características del terreno (saturación de agua, canales, obstrucciones, etc.).

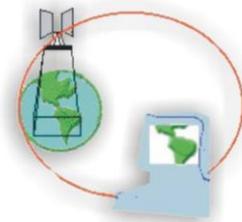


Figura n°3. Imágenes del evento real en comparación con la simulación



Fuente: Rinaldi et al. (2019)

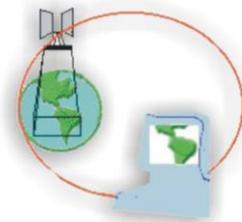
Finalmente la tesis doctoral de Guerrero del CINEA de la UNCPBA denominada “Configuración espacial y procesos de gestión del recurso hídrico superficial en la ciudad de Tandil. Eventos hídricos e inundaciones entre 1951-2017” (2019) aborda la ocurrencia de inundaciones y su relación con la gestión de los recursos hídricos superficiales y el crecimiento urbano de Tandil en la Cuenca Alta del Arroyo Langueyú (CUSAL) entre los años 1951 y 2017. Históricamente el crecimiento urbano de la ciudad de Tandil ha estado mediado por las condiciones ambientales de emplazamiento y diferentes actuaciones en la gestión del recurso hídrico para mitigar inundaciones



periódicas en el ámbito de la CUSAL. Las intervenciones físicas y regulatorias con el fin de gestionar el desborde de los arroyos que atravesaban la ciudad y reducir los impactos producidos por eventos hídricos excepcionales e inundaciones fueron generando cambios en los procesos naturales en la hidrología local modificando el ciclo de agua a nivel superficial, reduciendo la infiltración, modificando la escorrentía, los cauces, y pendientes, etc., y en los elementos artificiales creados para reducir los excesos hídricos, insuficiencia de la capacidad de transporte del agua del sistema pluvial, aumento del agua de escorrentía por la impermeabilización, entre otros.

Como resultado el territorio fue transformando y dando origen a tres situaciones o respuestas del territorio frente a eventos hídricos excepcionales según plantea la autora: 1. La reducción o la no ocurrencia de anegamientos/inundaciones en ciertos sectores favorecidos por las intervenciones estructurales; 2. El desplazamiento de las áreas afectadas tradicionalmente hacia otras zonas de reciente ocupación, lo que demanda de nuevas intervenciones estructurales y no estructurales y de gestión para reducir eventos hídricos, especialmente frente a la expansión urbana; y 3. La recurrencia y/o persistencia de inundaciones en zonas intervenidas estructural y no estructuralmente que, junto con procesos de densificación e impermeabilización creciente, siguen inundándose en condiciones de precipitaciones excepcionales.

En la tesis se aborda la ocurrencia periódica de inundaciones desde una perspectiva integral que considera el fenómeno inundaciones como parte de un proceso histórico de interacción entre la gestión del agua en general, y de los subsistemas de pluviales y de inundaciones en particular, y el crecimiento urbano y los actores e instituciones locales, provinciales y nacionales que los protagonizaron. En cuanto a la ocurrencia de inundaciones una variable que cobra fuerza es el clima y sus cambios cíclicos que favorecen la alternancia de inundaciones y sequías a nivel regional. A esta escala, las inundaciones son fenómenos recurrentes y alternados con períodos de sequías a los que se suman cambios en los montos medios de las precipitaciones y el desplazamiento en el sentido E-O de la isoyeta de 900 mm con montos de precipitaciones medias superiores. Metodológicamente, se recurrieron a determinadas categorías y variables de análisis, tanto naturales como sociales (urbanización, obras, inundaciones, procesos inmobiliarios especulativos, planificación, etc) donde fue posible caracterizar el fenómeno urbano identificando cambios espaciales y temporales, que confluyeron en la transformación territorial del paisaje original, y su interacción con la



ocurrencia de precipitaciones excepcionales, que provocaron en forma recurrente inundaciones y anegamientos en el área de estudio. En este sentido son importantes los análisis de la dinámica natural de la gestión del agua a nivel de cuenca; sobre la zona serrana (aguas arriba), en el área urbana y en la transición hacia la llanura (aguas abajo).

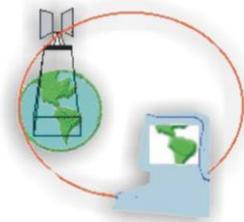
1.5 Medidas para la reducción del riesgo de inundaciones urbanas: Planificación y ordenación del territorio.

Como se esbozó en el apartado 1.4, el análisis del riesgo en áreas urbanas también requiere un enfoque desde la prevención, evaluación, predicción y mitigación de impactos, por lo cual, se pueden mencionar como antecedentes técnicos y teóricos el rol de planificación, gestión y ordenación del territorio.

Gómez Orea (2003) sostiene que la ordenación del territorio se entiende como una disciplina técnica que se aplica de forma multi e interdisciplinar a la consecución de dos objetivos básicos: la corrección de desequilibrios territoriales y la localización espacial de las actividades sociales. Posee un rol activo en las relaciones de complementariedad, compatibilidad e incompatibilidad que se dan entre ellas, como un instrumento preventivo de gestión ambiental y como metodología para la planificación del desarrollo sostenible.

En Baxendale (2015) se define como ordenación a los procesos y acciones organizadas entre sí, de carácter intelectual (plan) y ejecutivas (gestión), que tienen como meta el desarrollo sostenible en un área. De esta manera se diferencia a la planificación, como el proceso con base técnico-científica que permite la realización de una herramienta de carácter intelectual (plan) diseñada para la acción futura, de la gestión, considerada como el conjunto de decisiones, diligencias y actuaciones que conducen a la administración de recursos, al desarrollo de actividades económicas y a la ejecución de planes.

Las tecnologías de geoprocésamiento y análisis espacial (Baxendale, 2015; Fuenzalida Díaz, 2015; Buzai, 2017) acompañan el análisis territorial y la planificación del sistema urbano e intervienen directamente como instrumentos para la gestión,



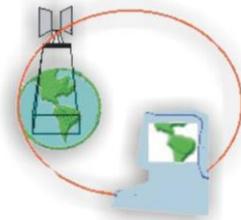
monitoreo y toma de decisiones a diferentes escalas con el objetivo de reducir la incertidumbre y mitigar las consecuencias de las inundaciones urbanas.

En este sentido es necesario que la ordenación del territorio gire en torno a tres elementos: las actividades humanas, el espacio en que se ubican y el sistema que entre ambos configuran (Gómez Orea, 2003). Un modelo territorial se plasma en las actividades (los usos del suelo) que se localizan en el territorio, en los asentamientos poblacionales y en los canales de relación (infraestructura viaria y de servicios) que garantizan la funcionalidad del sistema. Si pensamos en los objetivos de un plan de ordenamiento, este debe hacer énfasis en el desarrollo integral, equilibrado y en términos de calidad de vida y se expresan en términos de equilibrio (justicia territorial y espacial), integración (territorial y sectorial), funcionalidad (relaciones entre las actividades a través de flujos), uso racional de los recursos y calidad ambiental.

La funcionalidad implica organización espacial, control del uso del suelo, accesibilidad de la población a la explotación de los recursos territoriales, a los lugares de trabajo y a los equipamientos y servicios públicos (Gómez Orea, 2003).

En cuanto a la utilización racional del territorio y la gestión responsable de los recursos naturales se asume la importancia de conservar los procesos ecológicos esenciales, presididos por los postulados del desarrollo sostenible tanto en preservar, desarrollar y mantener a largo plazo el potencial de utilización del suelo y los recursos que contiene, como en respetar los criterios ecológicos para la sostenibilidad, entendiendo el territorio como fuente de recursos (tangibles e intangibles), como soporte de actividades y como receptor de efluentes. Aquí radica el comprender que la racionalidad del uso del suelo atiende también a los riesgos y procesos naturales, como las inundaciones, evitando su localización en áreas de peligro o vulnerabilidad.

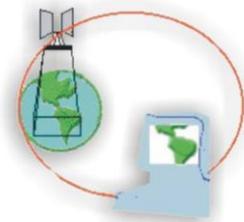
Gómez Orea y Gómez Villarino (2018) abordan los conceptos de sostenibilidad y resiliencia como complementarios porque ambos aluden a la capacidad de permanencia en el tiempo, a su capacidad para adaptarse al estrés y al cambio. Si bien el concepto de sostenibilidad es más amplio e incluye al segundo, la sostenibilidad requiere, por un lado, evitar (o reducir) cambios indeseables (derivados por ejemplo del cambio climático) o la generación de impactos negativos y/o conflictividad social y, por otro, afrontar, recuperar cambios indeseables inevitables o impactos negativos ("retroimpactos") asociados más a la resiliencia. Por ello la sostenibilidad da cuenta de tres dimensiones: la ambiental, social y económica, a la que los autores, añaden una



cuarta: la territorial (Gómez Orea y Villarino, 2018). Las dos primeras son más bien conocidas y transparentes. La dimensión económica debe entenderse con carácter subsidiario a la ambiental, donde el resultado de una actividad productiva no depende cuando lo económico se convierte en un objetivo exclusivo, sino que debe propiciar la búsqueda de sensibilidad ambiental, introduciendo el medio ambiente en la gestión de la empresa. Por último, la dimensión territorial se entiende en relación con el sistema territorial abordado en un inicio, cuyo enfoque se enmarca en la expresión espacial del estilo de desarrollo de una sociedad y conforma el marco físico en el que se desenvuelve la vida de la población y su calidad en términos de equilibrio, equidad, cohesión y competitividad territorial. En este sentido es posible hacer una correlación con las políticas de acceso a la ciudad y la complejidad de los términos justicia ambiental o territorial (Moreno Giménez, 2010).

“La dimensión territorial posee tres puntos de vista; el primero de ellos se refiere a la influencia de la estructura (también del funcionamiento) del sistema territorial en las demandas socioeconómicas y ambientales tan significativas para la sostenibilidad, como la de movilidad, la de agua o la de energía; incluso la generación de residuos. El segundo infiere a los notables efectos del comportamiento de las actividades sobre el sistema territorial y por tanto sobre la calidad de vida. Y el tercero radica a los efectos del entorno en términos de amenazas y riesgos para las actividades” (Gómez Orea y Villarino, 2018; p. 6). De este análisis, los autores señalan las claves para atender a los principios generales y criterios específicos de sostenibilidad basados en la Estrategia Territorial Europea (ETE), una política de Ordenación del Territorio propuesta por la Unión Europea y adoptada como instrumento básico para alcanzar el desarrollo sostenible. La ETE debe constituir la plataforma ideológica de la que partirán las decisiones de todos los implicados en la concepción, planificación y gestión de cualquier actividad. “La corresponsabilidad, el reconocimiento de los límites de los recursos, la solidaridad en el tiempo y en el espacio, la cohesión social y territorial, los principios de precaución, internalización de costes, contaminador pagador, etc., formarán parte del bagaje intelectual con el que se afrontan las decisiones” (Gómez Orea y Villarino, 2018; p. 8).

Finalmente la compartimentación de la ciencia y de la técnica y la falta de perspectiva espacial, son causa de insatisfacción técnica y económica al producir efectos indeseados no previstos. Esta compartimentación tiene su paralelo en la



estructura y organización de los poderes públicos, responsables de la gestión del sistema territorial. Se comprende así la importancia de la coordinación intersectorial entre los entes administrativos del mismo nivel competencial, mediante el intercambio de información entre entidades del mismo nivel y de niveles superior e inferior. Ambos tipos de coordinación administrativa, horizontal y vertical, unida a la necesidad de concertación entre los agentes socioeconómicos, requieren de un plan previo sobre el que negociar la concertación (Gómez Orea, 2003; p.8).

Gustavo Buzai permite complementar el aporte de Gómez Orea y Claudia Baxendale (2015) diferenciando al interior del ordenamiento territorial la planificación y la gestión territorial. En sintonía con Claudia Baxendale, la primera contempla acciones organizadas de carácter científico-profesional y la segunda las de carácter ejecutivo, ambas con la finalidad de obtener el desarrollo armónico y sostenible de un objeto de estudio y de intervención. La planificación territorial es de base tecnológica-científica y posee varias etapas. La primera de ellas, la de diagnóstico, realiza el análisis del sistema territorial pasado, presente y sus posibilidades futuras, y encuentra sustento científico en la geografía aplicada ante la utilización de procedimientos del análisis espacial tendientes a interpretar aspectos estructurales; su segunda etapa, de las propuestas, apunta a la búsqueda de alternativas que lleven a modificar la estructura del sistema y sus tendencias en la búsqueda de soluciones, las cuales estarán orientadas principalmente hacia una serie de objetivos fundamentales como resultan ser la búsqueda de equilibrios territoriales con eficiencia, justicia espacial, equidad (económica y social) y sostenibilidad, el desarrollo regional, la compatibilidad de usos del suelo y la mejora en la calidad ambiental y calidad de vida (Gómez Orea, 2008).

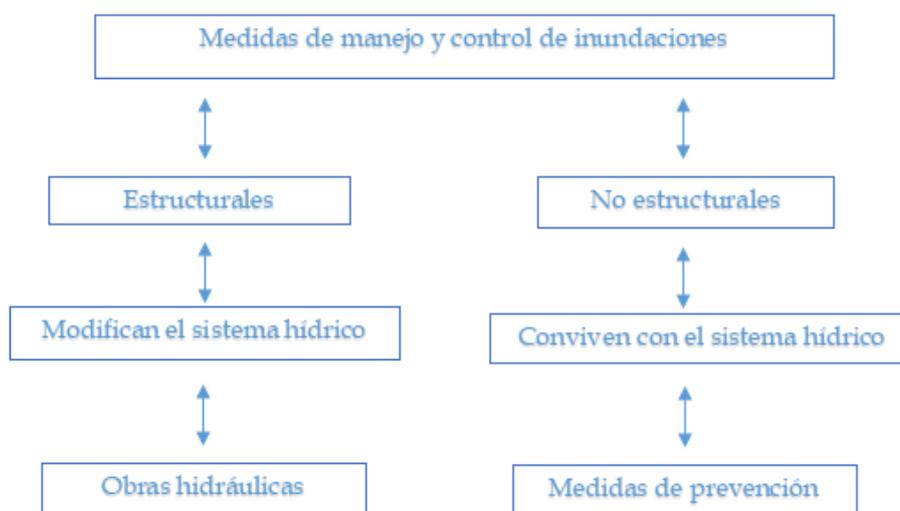
“Es en el nivel de la planificación en el cual la geografía aplicada, apoyada por el uso de los Sistemas de Información Geográfica, encuentra su posibilidad de concreción como práctica de importancia. Sus aportes estarán orientados a conocer la realidad territorial mediante una focalización espacial que lleva a la búsqueda de soluciones geográficas a problemáticas vinculadas a la lógica espacial de la sociedad” (Buzai, 2017; p.14).

Desde un punto de vista técnico, las políticas públicas de intervención hacia los problemas de drenaje urbano, anegamientos e inundaciones derivan en la ejecución de medidas estructurales y no estructurales según se muestra en el cuadro n°1 aplicadas sobre el territorio para amortiguar los impactos y actuar ante la incertidumbre que genera



una amenaza. Bertoni (2004 y 2019) señala que las primeras tienen como objetivo modificar el sistema hídrico mediante el desarrollo de obras de ingeniería civil y/o hidráulica para evitar o minimizar los principales inconvenientes y daños que generan las inundaciones. Otros ejemplos engloban las obras de ingeniería forestal y de ecohidrología (forestación, renaturalización de laderas y cauces, etc.). Las segundas se enfocan en la prevención, alerta o plan de contingencia para reducir la incertidumbre ante un evento de características extremas. Incluye aquellas en que los perjuicios ocasionados por las inundaciones son reducidos a través de una mejor convivencia de la población con las crecidas del río y se materializan mediante acciones sociales, económicas, administrativas y de instancias participativas de concientización y educación ambiental.

Cuadro n°1. Tipos de medidas para el manejo y control de las inundaciones



Fuente: Bertoni. (2019)

Una obra vial (ruta, autopista, etc.) generalmente acelera, retarda o desvía el escurrimiento superficial y a veces produce hasta los tres efectos a la vez, en distintas partes de su extensión. Por ello se suele decir que una obra vial es también una obra hidráulica, que puede aumentar o minimizar los problemas derivados de las inundaciones. No hay duda entonces de que cuando se construye una ruta es muy



importante analizar el comportamiento de la hidrología de las cuencas que la misma atraviesa (Bertoni, 2019).

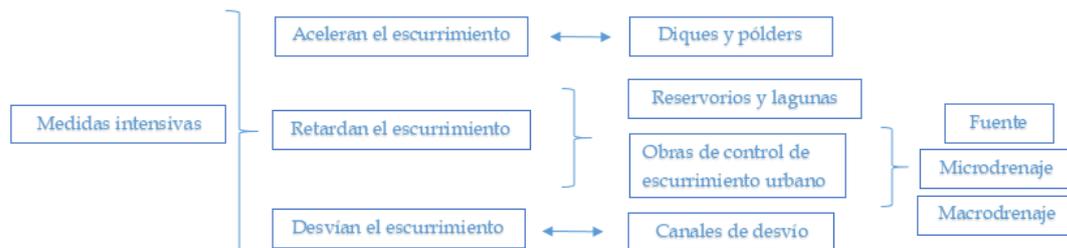
Entre las medidas no estructurales se incluyen la planificación y el ordenamiento territorial, la implementación de sistemas de alerta temprana frente a eventos hidrometeorológicos, la vigilancia satelital, la adopción de estrategias de gestión integral de recursos hídricos y el diseño y puesta en práctica de planes de contingencia. La planificación y ordenamiento del territorio juegan un rol central como medidas preventivas del riesgo y, en comparación con las medidas estructurales, demandan líneas de actuación de mayor complejidad tanto en mecanismos de gestión como en plazos de ejecución. Actúan como herramientas para la gestión del riesgo a partir del conocimiento de las potencialidades y restricciones en el territorio. Entender esta realidad territorial permite proyectar los usos y actividades en cada municipio orientando planes de inversión pública y privada que impliquen la puesta en marcha de obras de infraestructura necesarias así como otras medidas no estructurales que acompañen su desarrollo (Bertoni, 2004).

Si avanzamos en el planteo de medidas estructurales en el cuadro n°2 Bertoni (2019) y Tucci (2007) plantean que pueden subdividirse en:

- *Intensivas*: Cuando se realizan dentro del sistema de drenaje, es decir, dentro del curso del río principal y/o sobre los cursos de agua de menor envergadura, por ejemplo, arroyos.
- *Extensivas*: Cuando se realizan y actúan en distintas partes de la cuenca hidrográfica modificando las relaciones entre la precipitación y el escurrimiento superficial, por ejemplo, mediante la alteración de la cobertura vegetal del suelo, que reduce y retarda los picos de crecidas y controla la erosión de la cuenca. Es importante considerar que muchos autores las definen como medidas no estructurales porque no involucran obras de infraestructura hídrica.



Cuadro n°2. Tipos de medidas estructurales



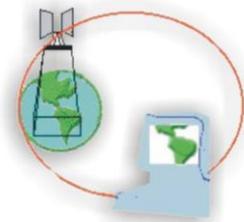
Fuente: Bertoni. (2019)

Las funciones principales del desarrollo de estas propuestas de acción giran en torno a acelerar, retardar y/o desviar el proceso de escurrimiento. Particularmente las obras dirigidas a retardar el escurrimiento generan cambios en la fuente mediante el desarrollo de áreas verdes, pavimentos permeables, pequeños reservorios domiciliarios en patios y jardines, etc. Las aplicaciones llevadas a cabo en el subsistema de microdrenaje incluye la creación de paseos, plazas y áreas públicas con incremento de áreas verdes además del trazado de las calles, los sistemas de cordón-cuneta y/o alcantarillas, las bocas de tormentas y los sistemas de conducción subterránea hasta el macrodrenaje, que integra todos los cursos del escurrimiento definidos por reservorios de detención y de retención teniendo en cuenta las depresiones topográficas naturales de la cuenca, aun siendo efímeros (Bertoni, 2004). Por su parte, los canales de desvío logran amortiguar el volumen y reducir el caudal del canal principal. Se puede afirmar que el alcance de las medidas y la operatividad dentro de la gestión y planificación del territorio depende de los intereses de los actores y agentes que producen, usan y consumen el espacio urbano de la ciudad.

La importancia de mencionar y diferenciar cada una de estas medidas y políticas de acción para mitigar impactos radica en poder reflexionar sobre los alcances y desafíos que podrían materializarse en los municipios si se trabajara conjuntamente en los conceptos de sostenibilidad, equidad y justicia espacial. Por ejemplo a partir del tratamiento, mantenimiento y extensión de la red de desagües pluviales, el desarrollo de nuevas obras de infraestructura, el ajuste de indicadores urbanísticos, la aplicación



de restricciones a la densificación en determinadas áreas, la regularización de usos, la generación de nuevos espacios verdes que actúen como amortiguadores de infiltración, entre otras medidas de planificación y gestión urbana.



2. La modelización de procesos hidrológicos urbanos: área de estudio, dimensiones de análisis y variables

Los factores de riesgo desarrollados en el capítulo 1, resultantes de la interacción entre dos componentes que se condicionan mutuamente: la amenaza y la vulnerabilidad implican que un fenómeno natural no se convierte en amenaza si no existe una sociedad vulnerable a su ocurrencia. En este punto las inundaciones son consideradas como amenazas hidrometeorológicas dado que su origen se debe a fenómenos hidrológicos y climáticos y la vulnerabilidad alude a las condiciones sociales, económicas, culturales, institucionales y/o de infraestructura que hacen susceptible a una población frente a una amenaza determinada. Estas condiciones son siempre previas a la ocurrencia de un desastre y determinarán la intensidad de los daños que produzca la amenaza (González et al., 2015).

Teniendo en cuenta los eventos hidrometeorológicos es importante analizar la variabilidad climática de la llanura pampeana bonaerense y, en especial, de la Pampa Deprimida a partir de los cambios cíclicos que favorecen la alternancia de inundaciones y sequías a nivel regional como dan cuenta la cantidad de antecedentes que responsabilizan de estos eventos al fenómeno de La Niña y El Niño.

En el Sistema de Información de Clima y Agua, el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) define al fenómeno de El Niño - Oscilación Sur (ENOS) como “un patrón climático recurrente que implica cambios en la temperatura de las aguas en la parte central y oriental del Pacífico tropical. En períodos que van de tres a siete años, las aguas superficiales de una gran franja del océano Pacífico tropical se calientan o enfrían entre 1 ° C y 3 ° C, en comparación con su temperatura normal. Este calentamiento oscilante y el patrón de enfriamiento, es conocido como el ciclo ENOS (o ENSO por sus siglas en inglés), afecta directamente a la distribución de las precipitaciones en las zonas tropicales y puede tener una fuerte influencia sobre el clima en otras partes del mundo. El Niño y La Niña son las fases extremas del ciclo ENOS; entre estas dos fases existe una tercera fase llamada Neutral” (INTA, 2014).

En la región pampeana argentina, el fenómeno de El Niño está asociado a un incremento de las precipitaciones y el de La Niña a una disminución de las mismas (INTA, 2014). Sin embargo que los fenómenos se desarrollen no implica que afecte a las regiones sino que existe una mayor probabilidad de que suceda.



Según González et al., (2015) en diferentes años, los valores de las variables climatológicas (temperatura, precipitación, etc.) fluctúan por encima o por debajo de lo normal. La secuencia de estas oscilaciones alrededor de los valores normales, se conoce como variabilidad climática y pueden ser estacionales, intraestacionales, interanuales e interdecadales.

A esta escala, “las inundaciones son fenómenos recurrentes y alternados con períodos de sequías a los que se suman cambios, de larga duración, en los montos medios de las precipitaciones y el desplazamiento en el sentido E-O de la isoyeta de 900 mm y, consecuentemente, montos de precipitaciones medias superiores” (Guerrero; 2019, p. 21).

Según González et al., (2015) la precipitación y su variabilidad se toman como la principal amenaza para que se produzca el impacto de una inundación. En nuestro país la cantidad anual de lluvias ha sufrido cambios sostenidos en distintas regiones, y con distinta intensidad, en distintas épocas del año. También se han observado cambios muy significativos en la ocurrencia de eventos extremos de precipitación, tales como lluvias muy intensas ocurridas en poco tiempo y sequías prolongadas. La magnitud e intensidad de las lluvias que produzcan anegamientos o en su defecto inundaciones, como se distinguió en el apartado anterior, serán retomadas en una las dimensiones de la modelización hidrológica que refiere a los hietogramas de los eventos seleccionados.

Asimismo y recuperando un factor de riesgo central en la modelización de procesos hidrológicos urbanos señalado por Abellán (2016); Tucci (2007); Bertoni (2004) y González, Torchia y Viand (2015) resulta del impacto de la urbanización y el proceso de expansión urbana en el ciclo hidrológico durante el desarrollo de un evento hidrometeorológico. Entre ellos podemos mencionar la capacidad de absorción de los suelos, la insuficiente capacidad de descarga de los cursos de agua y la pendiente del terreno.

“La ocurrencia de precipitaciones intensas saturan la capacidad del sistema de desagüe pluvial, como consecuencia de un aumento del escurrimiento superficial producto de una disminución de la infiltración por superficies pavimentadas y edificaciones” (González, Torchia y Viand, 2015; 34).

En Tucci (2007) se menciona que la reducción de la infiltración del suelo se traduce en un mayor tiempo de permanencia del agua en superficie, aumentando la escorrentía superficial y la disminución del nivel freático, su flujo subterráneo y la



evapotranspiración. La falta de políticas públicas destinadas a favorecer el funcionamiento de los sistemas de abastecimiento de agua, alcantarillado sanitario, red de desagüe pluvial y tratamiento de residuos sólidos determinan la alteración del ciclo hidrológico.

Para concluir esta introducción a la modelización de procesos urbanos se presentará el área de estudio y continuando con el desarrollo técnico metodológico se abordarán cada una de las dimensiones de análisis para la configuración de las variables dentro del modelo.

2.1. La configuración y dinámica territorial de la ciudad de Tandil

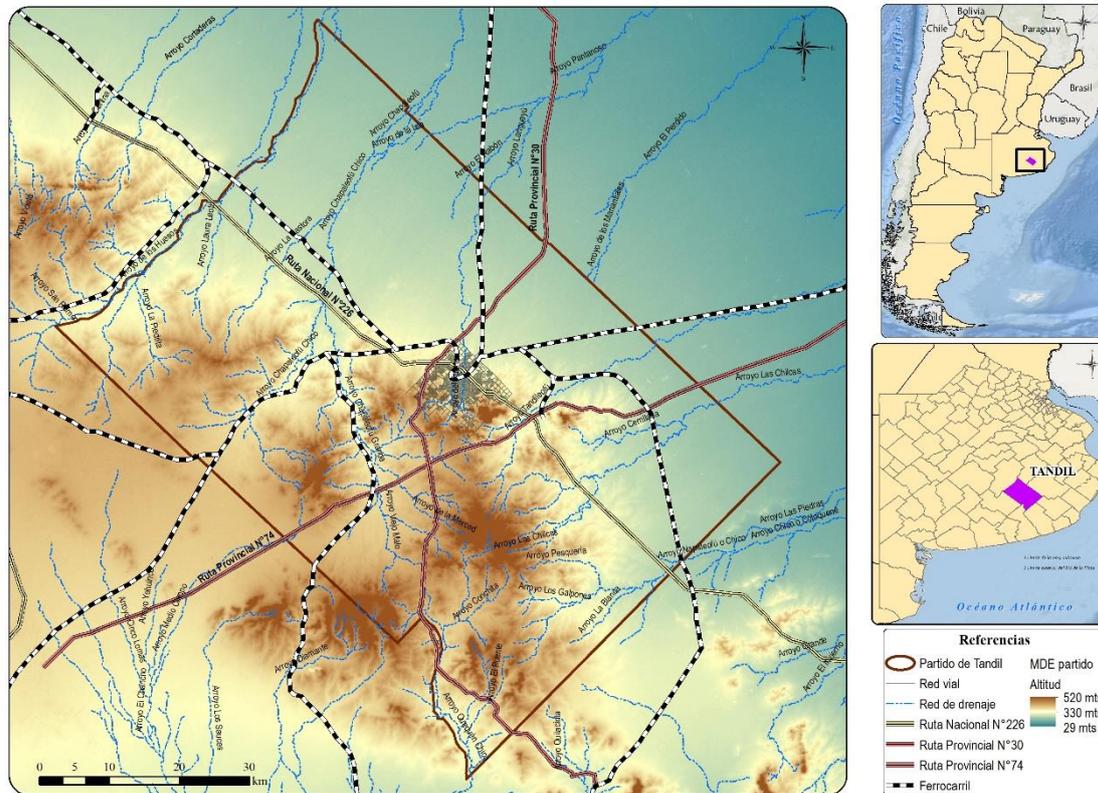
La ciudad de Tandil se localiza al sudeste de la provincia de Buenos Aires y conforma el sector central de las Sierras Septentrionales de la provincia. Carlos Cingolani (2008) las define como un cordón serrano discontinuo formado por sierras, cerros, cerrilladas y lomas que se encuentran separadas entre sí por valles y abras.

A grandes rasgos citando a Ruiz de Galarreta et al., (2013); Ruiz de Galarreta y Banda Noriega (2005), Barranquero et al., (2013) y Guerrero (2019) la ciudad se encuentra emplazada sobre un cordón de valles que descienden desde el sistema de Tandilia hacia el S y O; posteriormente se sitúa una transición hacia el piedemonte serrano, ubicado hacia el N y NE, con pendientes más suaves y, por último, la zona de llanura, desarrollada hacia al N del área urbana con altitudes que no superan los 150 metros.

El mapa n°1 muestra la localización del área de estudio, sus principales vías de circulación y accesos e indica como la topografía del terreno, la pendiente y la red de drenaje configuran el desarrollo del ejido urbano.



Mapa n°1. Contexto y localización de la ciudad de Tandil



Fuente: elaboración personal

Guerrero (2019) afirma que el crecimiento de la ciudad ha implicado la transformación del sistema natural o pre-urbano a un estado urbano a través de diversos procesos de artificialización del ambiente. “Esta transformación conlleva cambios de diversa magnitud e intensidad en factores preexistentes como la topografía, la traza y dinámica de la red de drenaje natural, las características edáficas o el perfil del suelo y los componentes sub-superficiales y subterráneos, como las napas o el basamento geológico, y la estructura y dinámica de la biota local” (Guerrero, 2019; p. 8).

Si analizamos la orografía y geomorfología de la región el sistema serrano de Tandilia emerge en forma de arco en la Pampa Húmeda bajo una extensión de 350 kilómetros en sentido NO-SE desde la localidad de Blanca Grande hasta culminar las exposiciones rocosas en el cabo Corrientes, en el litoral atlántico según se muestra en la figura n°4.



“En la región de Tandil-Barker (parte central de las sierras) alcanza su ancho máximo, de unos 60 km. Las sierras, cerros, cerrilladas y lomas son de baja altura, en general inferior a los 500 m, que sobresalen entre 50 y 250 m de la llanura pampeana” (Barranquero et al., 2015; p.34).

En este arco serrano se encuentran expuestas las rocas más antiguas del país que datan desde 2.100 a 2.200 millones de años y corresponden al precámbrico medio conocidas con el nombre de Complejo Buenos Aires o con el término más amplio de Basamento Cristalino (Cingolani, 2008). Esta formación se destaca por la presencia de rocas metamórficas, plutónicas -granitos y rocas afines- y otras rocas ígneas de variada composición, que fueron parte de la historia de la ciudad a partir de la extracción de granito y rocas de aplicación, que generó la actividad canteril.

Los fenómenos vinculados a la tectónica de placas en la región fueron llevando a las rocas del Complejo Buenos Aires hasta la superficie y la erosión las fue desgastando hasta configurar un relieve de escasa altura. Posteriormente durante el precámbrico superior (900 y 700 millones de años atrás) el mar ingresa sobre el continente y las áreas antes emergidas pasaron a constituir plataformas marinas poco profundas, donde se originaron dos secuencias de rocas sedimentarias, que hacia el O y SO cubren parcialmente a las rocas del basamento. Aquí se localiza otra sección serrana llamada grupo de Sierras Bayas y Formación de Cerro Negro. En esta área, a fines del período precámbrico e inicios del paleozoico, comenzaron a depositarse arenas que por su diferente composición se transformaron en rocas calcáreas o calizas, debido a su alto contenido de carbonato de calcio y, posteriormente, fueron enriqueciéndose en magnesio hasta convertirse en dolomías (Cingolani, 2008). Otra agresión (con varios pulsos de avance y retroceso de las aguas) dio comienzo a nuevos episodios de sedimentación marina que originaron areniscas y pelitas, y nuevamente calizas con presencia de microfósiles.

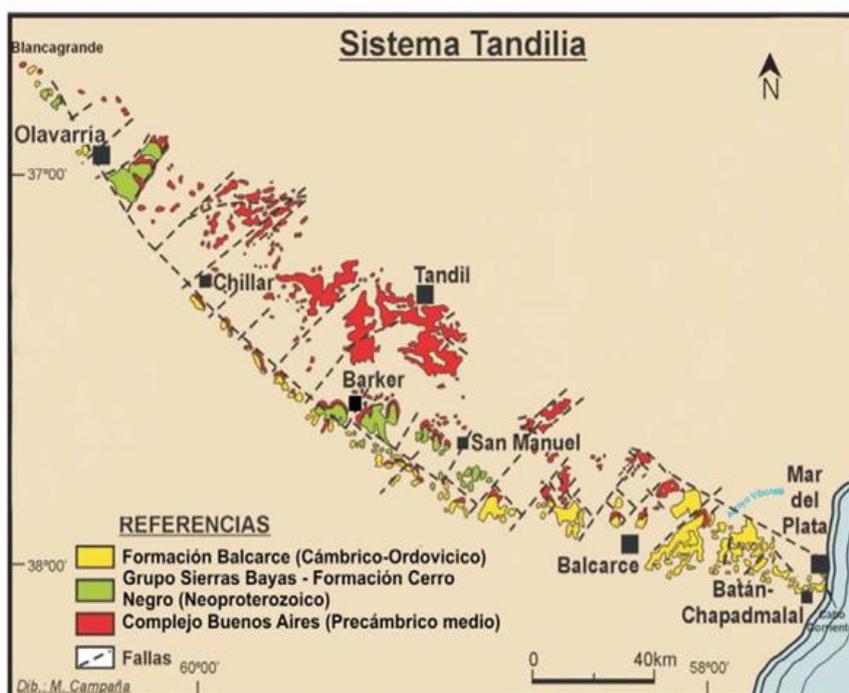
Finalmente en el Paleozoico inferior (Ordovícico) y posteriormente al ascenso y descenso de bloques, la región fue ocupada otra vez por el mar. Se instauró así un nuevo ambiente de plataforma marina somera con marcada influencia de las mareas y donde se depositaron grandes cantidades de arenas, que al consolidarse originaron los estratos o bancos de areniscas de la última sección: la Formación Balcarce. “Estas areniscas corresponden esencialmente a la variedad ortocuarcita (con más del 90% de granos de cuarzo, normalmente muy redondeados) y en ellas se pueden observar



numerosas trazas fósiles o icnofósiles, estructuras o marcas dejadas por organismos durante su desplazamiento, alimentación, descanso u otras actividades” (Cingolani, 2008; p.483).

En líneas generales estas formaciones o grupos serranos definen la estructura geomorfológica de la ciudad como puede visualizarse siguiendo el bosquejo de la figura. Por un lado, hacia el NO se distingue una Tandilia dómica o cristalina, constituida por rocas de origen precámbrico, las más antiguas de nuestro país y llamada de esta manera por la disposición de sus cerros, lomas y cerrilladas en forma de domos, sobre todo en las zonas de Tandil y Barker; y, por otro lado, una Tandilia tabular o sedimentaria de origen paleozoico, ubicada sobre la zona de Balcarce y Mar del Plata, hacia el SE.

Figura n°4. Bosquejo geológico general de Tandilia



Fuente: Cingolani. (2008)

Históricamente las condiciones de emplazamiento constituyeron un límite natural de expansión hacia el S-SE delimitado por las sierras, que, en la última década se han convertido en un instrumento de valorización y especulación. Este límite marcaba la configuración territorial del tejido urbano estableciendo contrastes en la distribución espacial de la población hacia el centro y S, decreciendo gradualmente la estructura de



clases hacia la periferia N-NE junto al deterioro de los precios inmobiliarios y calidad de los servicios colectivos básicos (Linares, 2007).

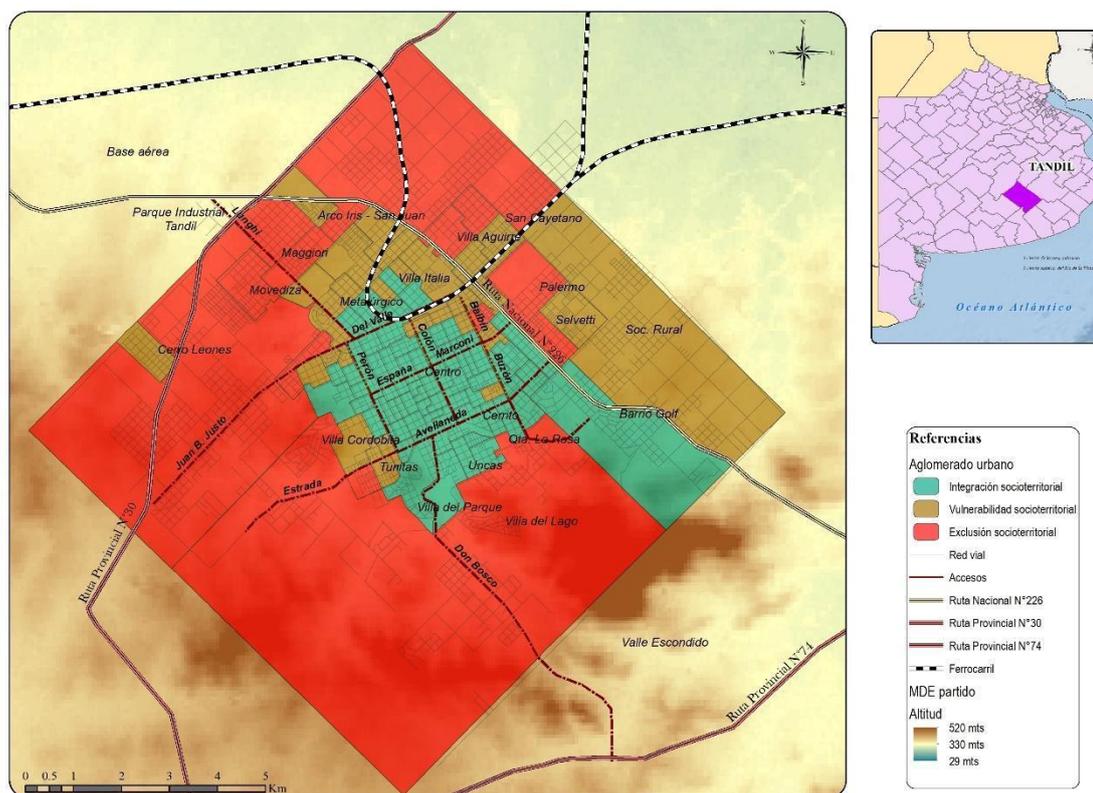
El desarrollo de un modelo urbano fragmentado materializado espacialmente por sus ejes de expansión urbana puede ser analizado en trabajos previos por Linares y Lan (2006) quienes propusieron una metodología para el estudio de la segregación urbana a partir de las dimensiones económica, sociocultural, política y espacial, a partir de todas las variables del Censo Nacional de Población y Vivienda, 2001³.

El mapa n°2 muestra el resultado de la matriz de segregación socioespacial mediante la delimitación de aglomerados urbanos según patrones de inclusión, vulnerabilidad y exclusión socioterritorial. Este mapa resulta interesante por la consideración de variables socioeconómicas, habitacionales y espaciales que hacen referencia a las condiciones de vulnerabilidad de algunos sectores urbanos y periurbanos frente a la carencia en las condiciones materiales de la vivienda, el ambiente circundante y la dotación de infraestructura tanto urbana básica como los equipamientos colectivos en general.

³ Las dimensiones del estudio de la segregación urbana y su metodología de análisis se detallan en: LINARES, S.; LAN, D. (2006). "Estudio de la segregación urbana mediante el uso de SIG: un aporte geográfico a la gestión municipal de Tandil, Argentina".



Mapa n°2. Aglomerados urbanos de inclusión, vulnerabilidad y exclusión socioterritorial de la ciudad de Tandil

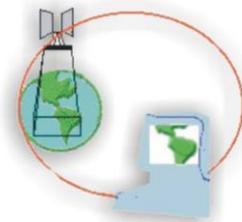


Fuente: elaboración personal en base a Linares y Lan. (2006)

Este estudio posteriormente fue complementado por Linares (2007); Migueltoarena (2011); Lan (2011) y finalmente actualizado a escala de radios censales según el Censo Nacional 2010 por Velázquez et al., (2014), Velázquez y Celemín (2020) en sus investigaciones sobre calidad de vida.

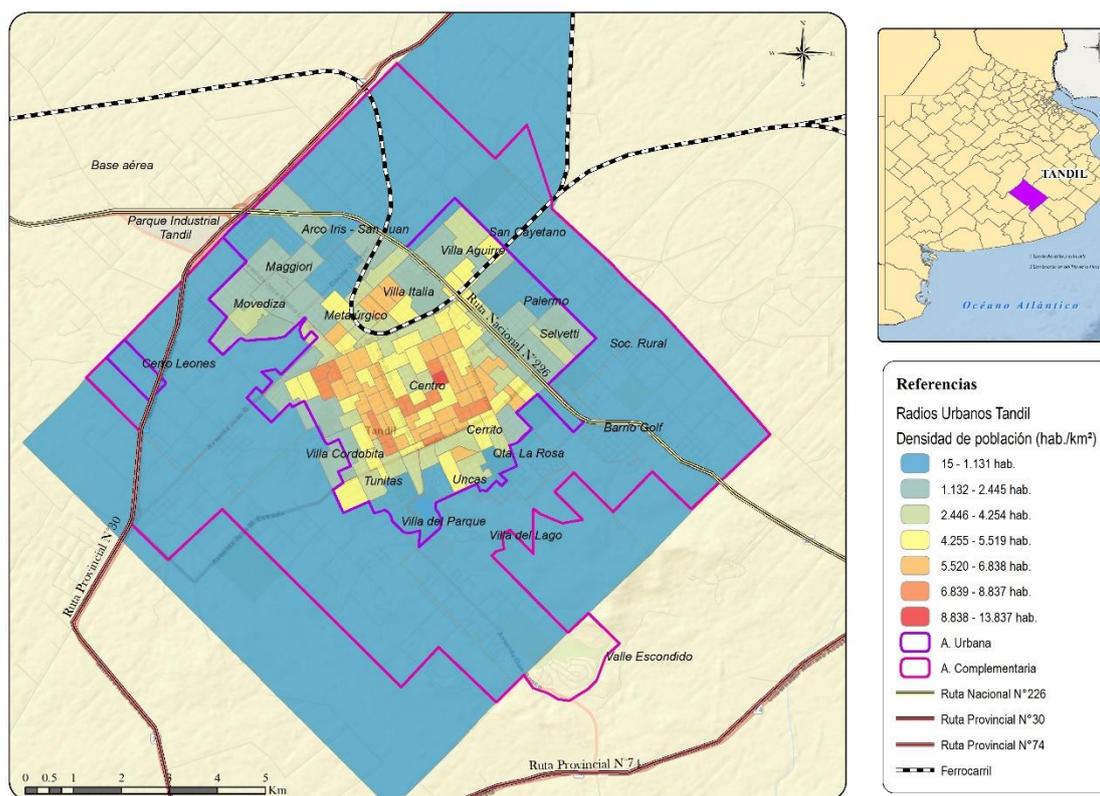
Para concluir Vapñarsky y Gorojovsky (1990), definen a la ciudad de Tandil como una aglomeración de tamaño intermedio (ATIS), y más precisamente una ATIS menor, por estar dentro de la categoría que va de 50.000 a 399.999 habitantes.

Marcos (2008), desglosa esta clasificación clasificando ATIS entre 50.000 y 99.999 hab.; entre 100.000 y 199.999 hab.; entre 200.000 y 499.999 hab.; entre 500.000 y 999.999 hab., y por último, de 1.000.000 hab. o más, excepto a la Aglomeración del Gran Buenos Aires (AGBA). De esta manera, la localidad se ubicaría en el segundo eslabón de ATIS entre 100.000 y 199.999 habitantes.



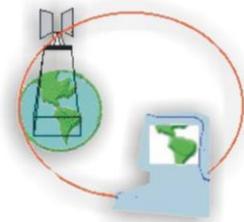
Actualmente la ciudad cuenta con 116.945 habitantes según los datos del último Censo Nacional de Población del INDEC (2010) distribuidos en los 146 radios censales urbanos. Haciendo cálculos estimados de variables poblacionales la superficie es de 133,73 km² y la densidad de habitantes promedio según la cantidad de población en viviendas particulares es de 4.440 hab./km². El mapa n°3 muestra una alta concentración de población en el centro con densidades que se ubican entre los 5.500 y 8.800 hab./km² (solo un radio posee el valor máximo), luego se localizan subespacios con densidades medias que alcanzan de los 2.400 y 5.500 hab./km² y finalmente las áreas transicionales menos pobladas entre el área urbana y complementaria con densidades inferiores a los 2.400 hab./km².

Mapa n°3. Densidad de población (hab./km²)



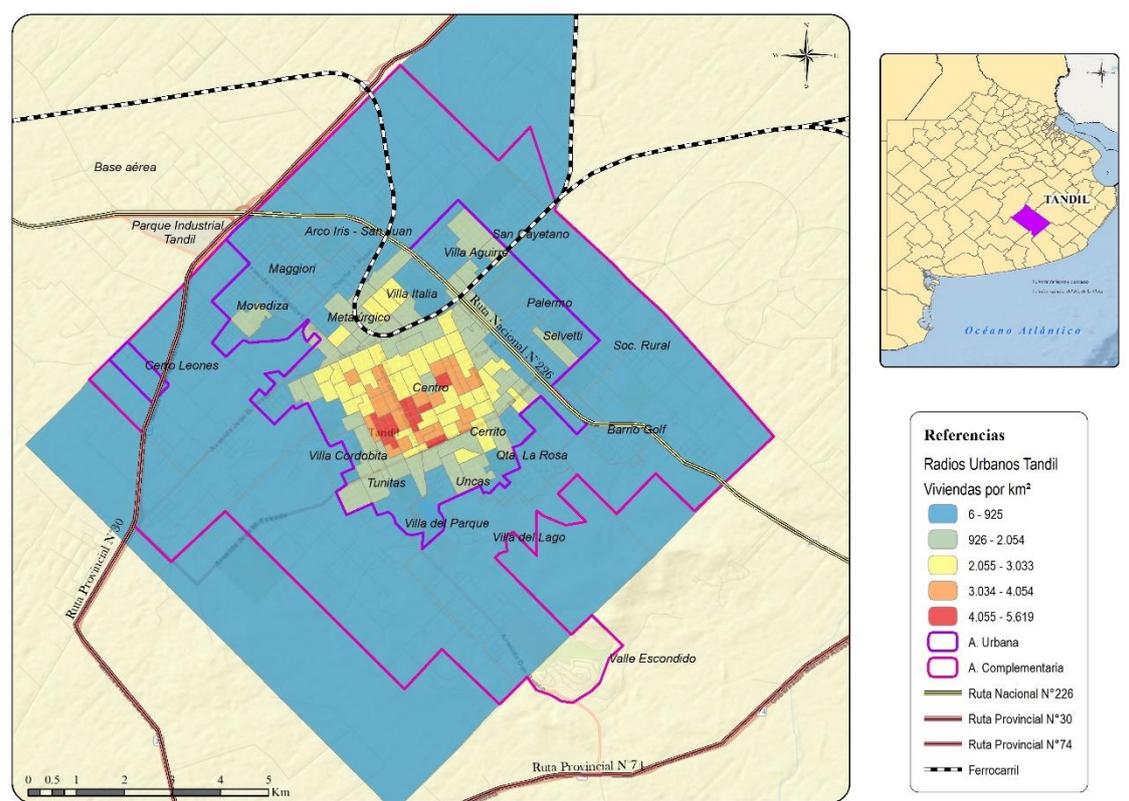
Fuente: elaboración personal en base a datos del INDEC. (2010)

El mapa n°4 referencia la distribución de viviendas particulares por km² representando un patrón espacial centro-periferia, donde la mayor densidad se localiza



en el intervalo que comprende entre 4.050 y 5.600 viviendas integrando 10 radios censales. Luego se ubican 58 radios con valores entre las 2.000 y 4.000 viviendas mientras que los 78 radios restantes no superan las 2.050 viviendas por km².

Mapa n°4. Densidad de viviendas particulares por km²

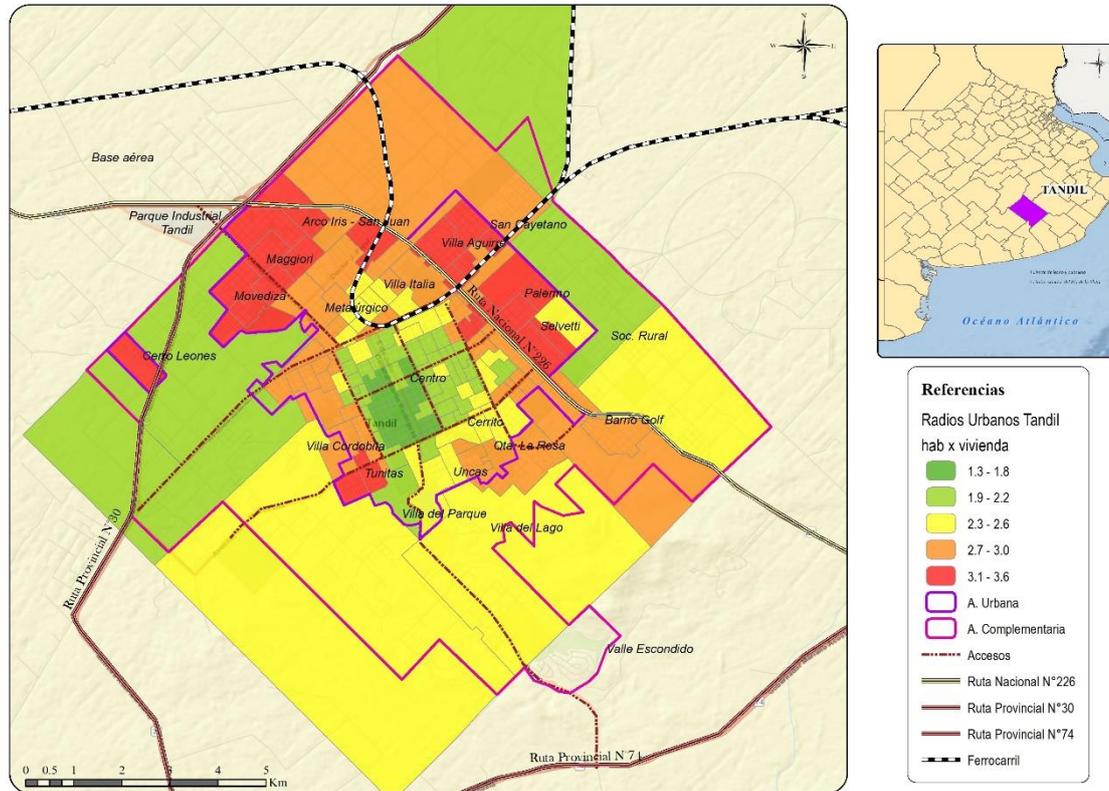


Fuente: elaboración personal en base a datos del INDEC. (2010)

Finalmente el mapa n°5 refleja el número de habitantes por vivienda calculado según la población en hogares particulares. De ello resulta a grandes rasgos que los radios localizados en la transición del área urbana a complementaria poseen el mayor número de habitantes por vivienda, mientras que la zona central y la ubicada dentro de las 4 avenidas (ejes de acceso principal) no superan los 2,2 habitantes por vivienda a excepción de algunos radios (7) que se ubican en el tercer eslabón comprendiendo entre 2,3 y 2,6 habitantes por vivienda y un (1) radio que se aproxima a los 3 habitantes por vivienda.



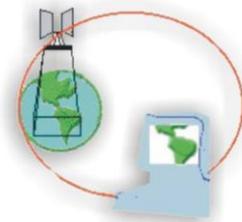
Mapa n°5. Densidad de habitantes por vivienda



Fuente: elaboración personal en base a datos del INDEC. (2010)

Las diferencias socioespaciales resultantes de estos mapas permiten identificar algunos parámetros de la configuración territorial de la ciudad como el área urbana edificada, la densidad de población, los ejes de crecimiento y expansión y su relación con las características topográficas del área circundante. En cada uno de los casos los indicadores forman parte de los factores de riesgo y vulnerabilidad que se analizarán en el área de estudio para la detección de zonas inundables y anegadas.

En los apartados siguientes se desarrollará cada uno en particular desagregando el modelo de datos y las variables que definirán las entradas del modelo hidrológico dinámico.



2.1.1 Caracterización de la cuenca urbana del Arroyo Langueyú

A escala regional el relieve característico de la llanura pampeana bonaerense es relativamente plano, suavemente deprimido y de muy bajo gradiente de pendiente. El terreno se encuentra cubierto de depresiones y no contiene un sistema de drenaje natural adecuadamente desarrollado. “La energía potencial del sistema se encuentra determinada por la diferencia de altura entre los puntos más altos de la cuenca y la sección de desagüe, la cual es muy baja” (Dalponte y Rinaldi, 2003, p.3).

En estas áreas el volumen de agua acumulado en las depresiones sobrepasa en muchos casos la ecuación de balance hídrico asociado a las características climáticas y pluviométricas en la alternancia de ciclos secos y húmedos. El agua que excede la capacidad de almacenamiento de las depresiones, se mueve como una lámina, muy lentamente sobre la superficie.

En Scioli (2009) se cita a Fertonani (1978) para establecer una diferenciación entre la hidrología de zonas de bajo y alto relieve, siendo una de las causas la importancia relativa entre las fuerzas que gobiernan el movimiento del agua. Para caracterizar el funcionamiento de estos dos sistemas se definieron los Sistemas hidrológicos típicos (SHT) y los Sistemas hidrológicos no típicos (SHNT) tal como se muestra en la figura n°5. Los primeros son sistemas en los cuales la estructura escurrimiento está conformada por escurrimientos unidimensionales, organizados y jerarquizados derivados de los cauces principales y sus tributarios. El agua escurre en forma más o menos ordenada hasta llevar los excedentes fuera del sistema. Los segundos, por lo general, no tienen una superficie de aporte definida, no puede fijarse un único punto de descarga y no cuentan con componentes unidimensionales, organizados y jerarquizados que conformen su red de drenaje. El agua escurre en forma desordenada, indefinida e imprevisible.

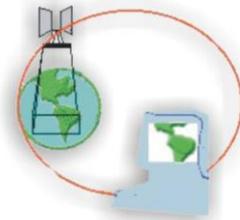
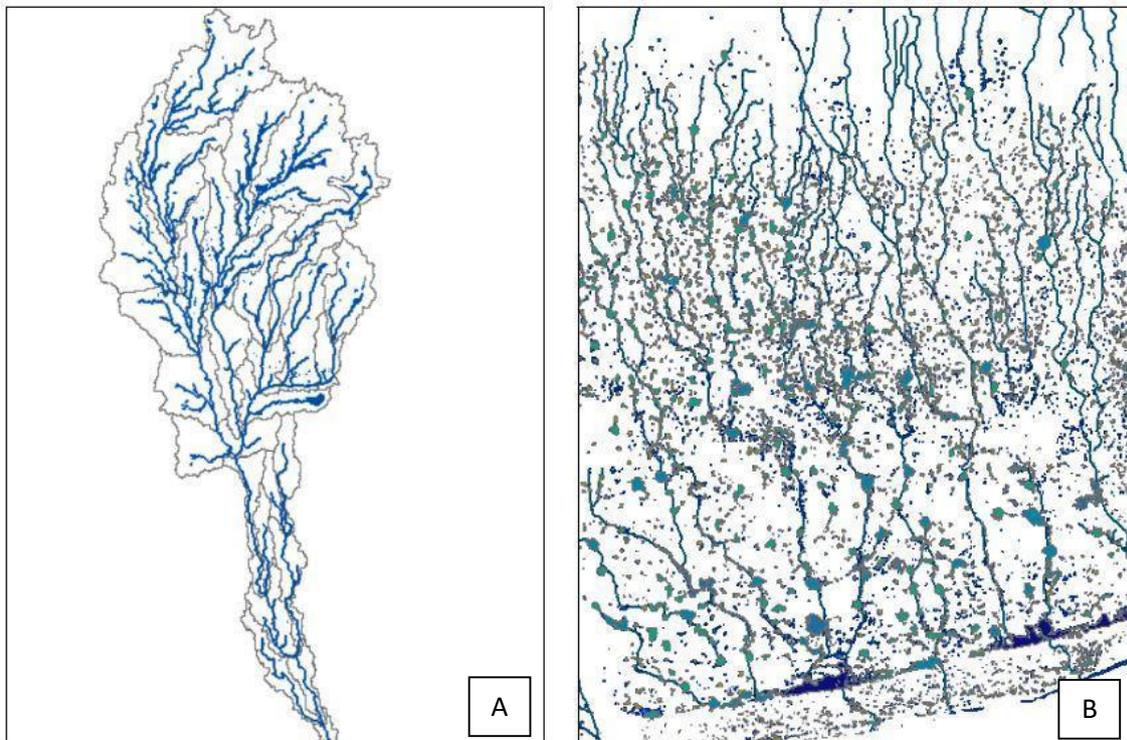


Figura n°5. A. Sistema hidrológico típico y B. Sistema hidrológico no típico

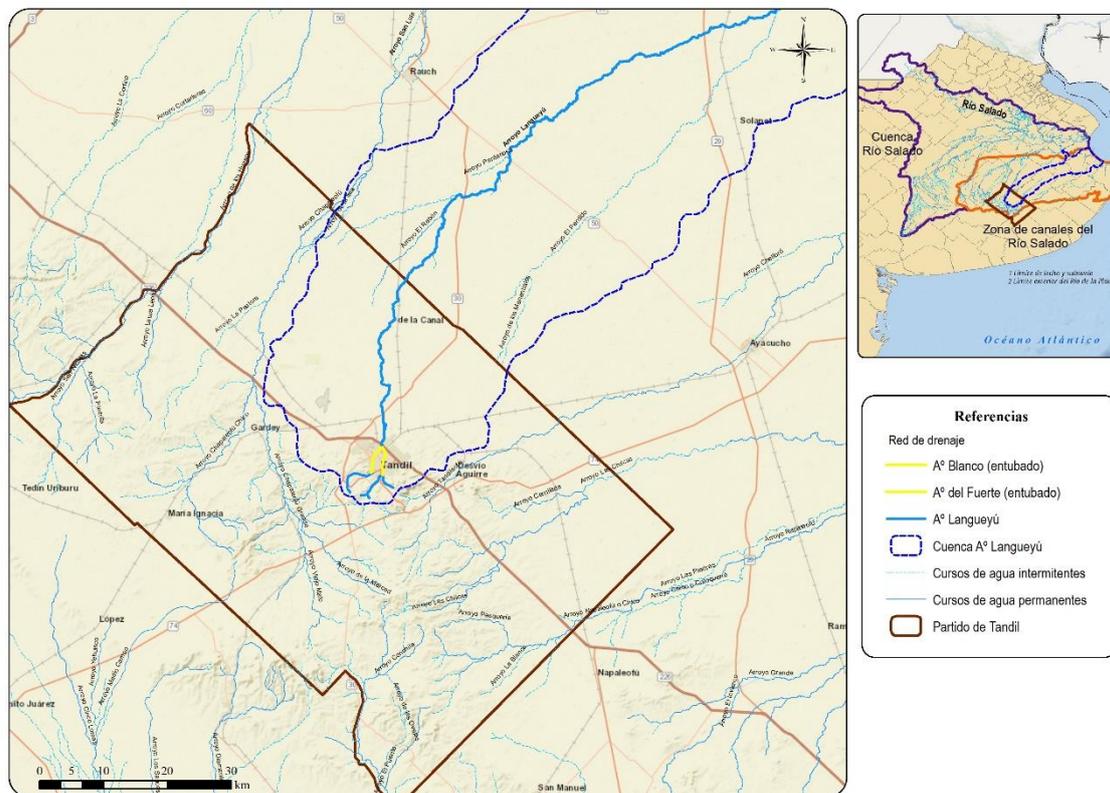


Fuente: Scioli. (2009)

Las condiciones de emplazamiento regional, la hidrografía y la red de drenaje han definido la configuración socioespacial y dinámica territorial del ejido urbano de la ciudad de Tandil desde su etapa fundacional.

El mapa n°6 muestra el sistema Languelyú sobre el cual se emplaza la ciudad. Este SHT nace en las sierras septentrionales a partir del aporte de pequeñas cuencas intraserranas en dirección N y culminando el escurrimiento hacia el NE hasta el canal N° 1 uniéndose a la depresión del Río Salado. El área de la cuenca dentro del partido ocupa una superficie aproximada de 1000 km² hasta su límite con Ayacucho y Rauch.

Mapa n°6. Localización de la cuenca Languelyú dentro del sistema del Río Salado



Fuente: elaboración personal en base al atlas digital de los recursos hídricos y aguas superficiales de la República Argentina. Instituto Nacional del Agua (INA). Subsecretaría de Recursos Hídricos (2002), Geoinfra⁴ y ANIDA (2010)⁵

La red de drenaje integra la cuenca hídrica N° 49 perteneciente a la zona de canales del Río Salado de Buenos Aires. Los arroyos se dirigen de S a NE por una planicie de escasa pendiente donde diversos canales facilitan que las aguas drenen hacia la Bahía Samborombón.

La región ocupa una superficie de 39.343 km² caracterizada por la presencia de arroyos, canales, lagunas y bañados (INA, 2002). En su mayoría los arroyos nacen en el cordón orográfico de las sierras septentrionales que se suceden en una cadena casi continua y forman el límite SO de la región.

⁴ Sistema de Información Geográfica de Infraestructura de Obras y Servicios Públicos

⁵ Sección Hidrografía/Aguas superficiales. Disponible en: <https://ide.ign.gob.ar/>



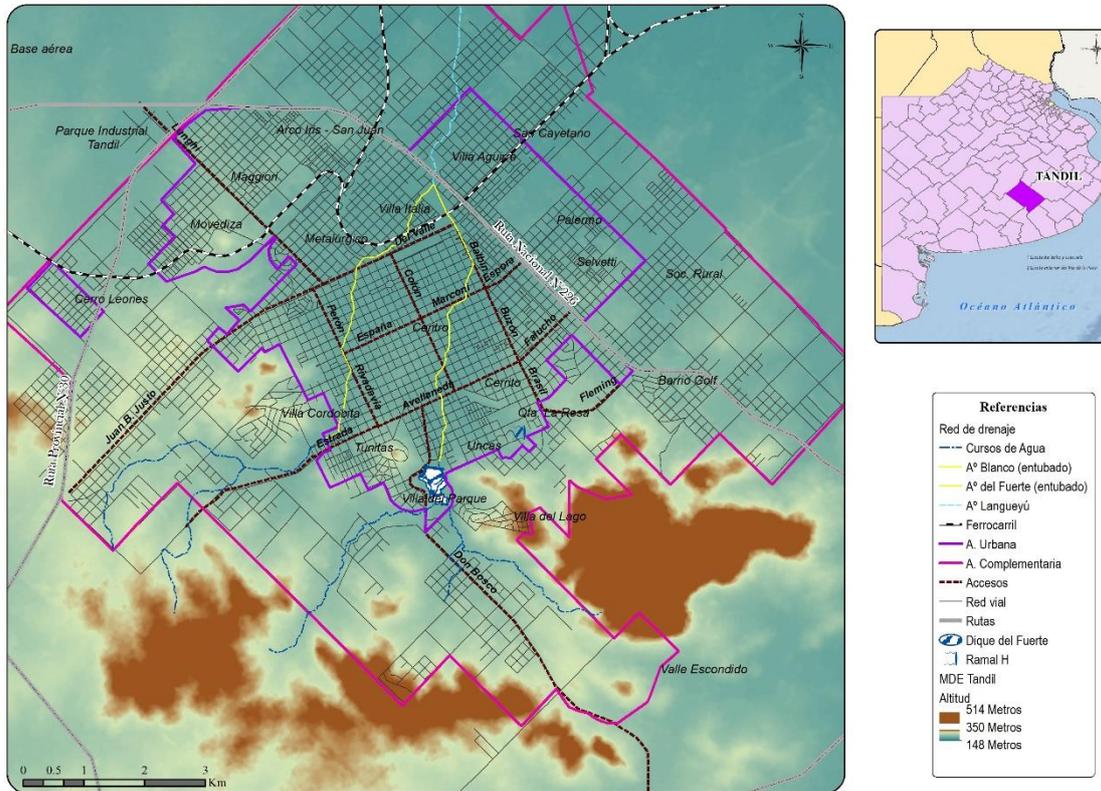
Guerrero (2019) señala que los arroyos que nacen en la llanura serrana simulan tener un área generadora con drenaje fluvial adecuado, pero al ingresar a las zonas bajas carecen de afluentes, apareciendo una amplia área interfluvial entre los mismos con lagunas aisladas, donde dominan los procesos verticales y se desdibujan los cauces.

Dentro del área urbana se destaca el aporte de sus dos afluentes: el arroyo Blanco, por el O, y el del Fuerte por el E. Ambos están entubados según puede visualizarse en el mapa n°7 desde las inmediaciones del sector serrano hasta alrededor de 300 metros antes de su confluencia donde comienza el arroyo Languyú, que escurre a cielo abierto. De esta manera la cuenca cubre casi en su totalidad el área urbana con una superficie aproximada de 76 km².

El arroyo del Fuerte se extiende desde el sector S y E, con una dirección de escurrimiento hacia el N-NE, mientras que el arroyo Blanco inicia su recorrido desde la zona S y O uniéndose al anterior. En la confluencia de ambos, sobre las inmediaciones de la ruta nacional N° 226, conforman el arroyo Languyú, que escurre como curso de agua abierto en dirección NO.



Mapa n°7. Red de drenaje en la circunscripción I de la ciudad de Tandil



Fuente: elaboración personal

Históricamente las características naturales del sistema serrano de Tandilia condicionaron la configuración espacial de la ciudad, ya que el Fuerte Independencia fue construido en el interfluvio de los arroyos del Fuerte y Blanco, localizado en un lugar elevado, para evitar inundaciones causadas por las posibles crecidas de estos cursos de agua (Lan, Linares, Di Nucci y López Pons, 2010).

A comienzos del siglo XX el desarrollo de la actividad canteril produjo el auge económico con la explotación de granito y rocas de aplicación hasta el año 2010 que se estableció el marco legal regulatorio de la actividad por la Ley 14.126 que declara "Paisaje Protegido de Interés Provincial" bajo los términos y condiciones de la Ley 12.704, al área del Partido de Tandil denominada "La Poligonal", conformada por la intersección de las actuales Rutas Nacional N°226 y provinciales N°74 y N°30. De este modo se restringe la actividad y debe relocarse y/o reconvertirse fuera del área de la poligonal.



La expansión de actividades primarias asociadas a la producción de alimentos en pequeños establecimientos agrícolas también fue importante junto a la dinamización que generó el sector industrial consolidado en la década de 1940 con el desarrollo de las ramas metalúrgicas y agroalimentarias, dinamizando las funciones urbanas a partir del aumento de la oferta y demanda de servicios y ocupando un lugar destacado en la estructura económica de la ciudad. Este proceso se consolidó hasta mediados de la década de los 70 con la ampliación del mercado mediante el desarrollo de nuevas industrias en otros sectores de la ciudad como el eje de una de las vías principales de acceso, la ruta nacional 226, la avenida Falucho y la creación del Parque Industrial Tandil (PIT). Este contexto impactó en el incremento poblacional y la dinámica ambiental, lo cual, implicó la construcción de obras de infraestructura de gran envergadura determinando los ejes de crecimiento y expansión urbana de la ciudad que se profundizarán en el siguiente apartado.

Los entubamientos de los arroyos se sucedieron durante la década del 70 y 80 con el fin de regular y reducir los impactos producidos por eventos hídricos excepcionales e inundaciones recurrentes evidenciadas desde la consolidación de la ciudad. Los antecedentes de la inundación de 1951 que afectaron a gran parte del área urbana y suburbana de la ciudad determinaron la construcción en el año 1958 del Dique del Fuerte según muestra la figura n°6 inaugurado en 1962 junto al Lago del Fuerte. Su función como regulador de caudales de crecidas permite disminuir el volumen a través de sus veinte bocas hacia el entubamiento. Esta obra evitó graves consecuencias en eventos posteriores como el ocurrido en 1966 y 1980.



Figura n°6. Dique del Fuerte



Fuente: La Macchia. (2022) y La Voz de Tandil. Fecha de consulta: 09/08/2021

Más allá de las intervenciones estructurales de orden nacional, provincial y local para gestionar los impactos de los eventos recurrentes y a pesar de haber generado resultados satisfactorios durante algunos años, en la actualidad, se observan graves problemas de drenaje. Ello se explica por la intensidad del crecimiento urbano y la expansión hacia los ejes de desarrollo territorial que implican, por un lado, una mayor dotación de equipamientos colectivos (cobertura de redes de servicios, infraestructura pluvial y pavimento, citando algunos ejemplos) y, por otro, la pérdida de superficies verdes y cambios en la hidrología superficial, principalmente en la infiltración, pendiente, desvío de cauces y la impermeabilidad de los suelos debido al aumento de la superficie edificada.

En la figura n°7 se visualiza la construcción del Ramal H en el año 2012, localizado hacia el SE de la ciudad; un dique seco que mediante contención y descarga permite regular los picos de crecidas en épocas de intensas lluvias. Aquí se evidencia un nuevo problema, ya que, si bien soluciona los problemas de drenaje y escorrentía en los accesos y barrios aledaños, el conflicto continúa en otras zonas aguas abajo de la presa y en aquellas áreas coincidentes con los ejes de expansión urbana residencial.



Figura n°7. Ramal H



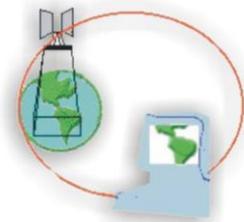
Fuente: La Macchia. (2022)

Para concluir “el proceso de configuración espacial de la ciudad y su relación a la ocurrencia de inundaciones ha estado mediado tanto por componentes regionales como locales que incluyen factores naturales y antrópicos, y que exacerbaban los efectos de las inundaciones a escala local” (Guerrero, 2019; p. 20). Para profundizar en ello se debe analizar cuáles son las principales áreas de consolidación y de crecimiento espontáneo de desarrollo urbano, sus características y el rol de la gestión y planificación territorial teniendo en cuenta los impactos derivados de la recurrencia de anegamientos e inundaciones.

2.1.2 Ejes de crecimiento, expansión urbana y peligro de anegamiento en la ciudad de Tandil

Tandil en la actualidad presenta una economía diversificada caracterizada por su desarrollo industrial, tanto en el sector metalmeccánico como alimenticio. Las nuevas funciones vinculadas al sector terciario como el agronegocio, la industria agroalimentaria y del software y la dinámica generada por las actividades financieras, comerciales y educativas, la posicionan hoy como el principal centro de alcance regional.

La localización de la casa de altos estudios, la Universidad Nacional del Centro de la provincia de Buenos Aires como polo científico tecnológico consolidó el crecimiento



urbanístico en forma radial de toda el área circundante ampliando la construcción de viviendas y residencias, la demanda de equipamientos colectivos y mejoras en general. Asimismo el rol preponderante ocupado por el auge del turismo recreativo desde mediados de los 90 implicó un boom en la dinamización de la ciudad, no solo como destino vacacional aprovechando la calidad paisajística del lugar y aumentando la oferta de servicios de hotelería, cabañas, locales comerciales y desarrollo de infraestructura, sino también como elección de lugar de residencia permanente por parte de los turistas. De este modo la ciudad se fue convirtiendo en los últimos años en un capital atractivo para el mercado inmobiliario y la producción de la vivienda.

En definitiva la configuración socioespacial del territorio y su complejidad derivada por su dinámica inter e intraurbana a través del tiempo ha generado transformaciones en el paisaje y en la calidad físico ambiental de la ciudad. Lan et al., (2010) afirman que las escasas y dispersas reglamentaciones de orden provincial y municipal, permitieron una intensificación del crecimiento espontáneo, dejando que las leyes del mercado regulen el proceso de expansión residencial.

Las sierras de Tandil constituían en gran parte el límite natural de expansión urbana tanto hacia el S como SO, las cuales en las últimas décadas, se han convertido en un instrumento de valorización por parte de algunos actores sociales como el mercado inmobiliario, el estado y agentes locales. Este límite marcaba la configuración territorial de la ciudad, estableciendo contrastes en la distribución espacial de la población hacia el Centro y S, decreciendo gradualmente la estructura de clases hacia la periferia N-NE junto al deterioro de los precios inmobiliarios y calidad de los servicios colectivos básicos (Linares, 2007).

Cabe destacar el accionar de organizaciones sociales como la asamblea ciudadana por la “Preservación de las Sierras de Tandil” quienes alzaron su voz frente a la alteración del paisaje natural serrano debido al desarrollo de proyectos inmobiliarios, convenios urbanísticos, nuevos loteos y excepciones otorgadas a actores privados.

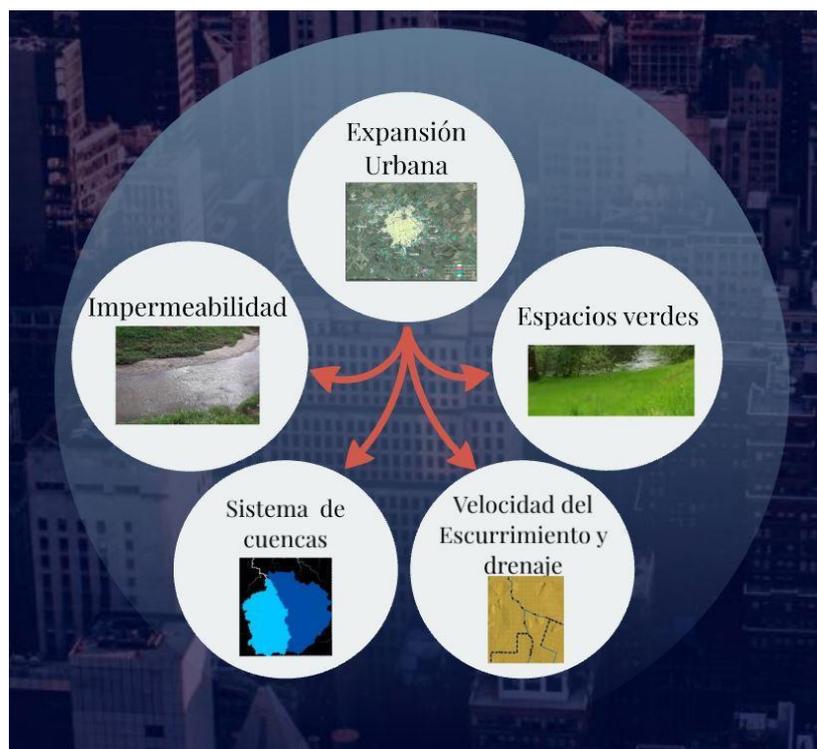
Si bien la implementación de políticas públicas de orden provincial y municipal como la normativa del Plan de Desarrollo Territorial y la Ley de Paisaje Protegido permitieron regular algunos usos de suelo y la restricción de actividades como la canteril, la naturaleza como mercancía sigue siendo la ecuación que prima en la configuración del territorio tandilense sin considerar sus impactos en la dinámica físico natural. El atractivo paisajístico dado por el ambiente serrano, la posición de Tandil como nodo



regional, su estructura económica, la diversificación de actividades y los proyectos comerciales e inmobiliarios generan grandes inversiones en todas las escalas y el valor de la naturaleza como bien común se desdibuja.

Algunas de las implicancias de la expansión urbana hacia los ejes de crecimiento espontáneo y el avance de la urbanización sobre el faldeo serrano hacia el S y SE de la ciudad se pueden resumir en la figura n°8, a partir de la alteración ambiental producida por la interacción de los procesos físicos urbanos que se materializan en el territorio. Cada uno de los procesos integra los factores de riesgo en áreas urbanas analizados en el capítulo anterior y se retomarán en el modelo de datos planteado en el capítulo siguiente.

Figura n°8. Impactos del proceso de expansión en áreas urbanas



Fuente: elaboración personal

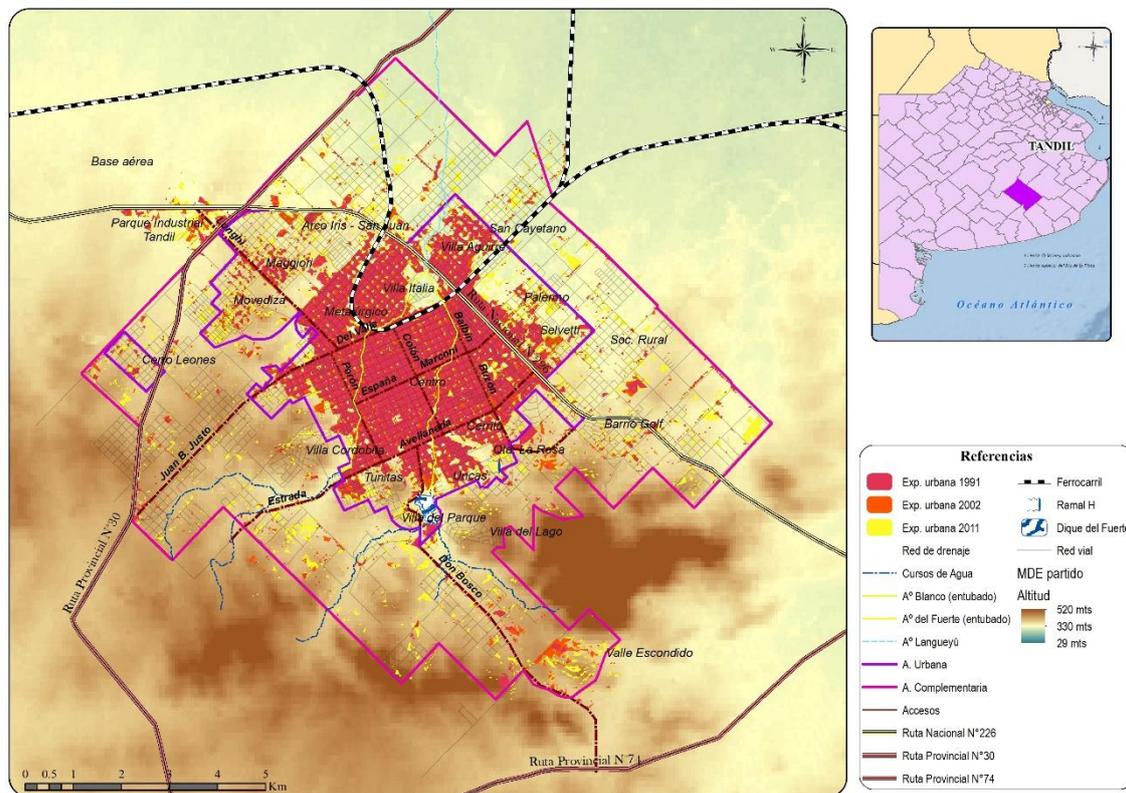
El crecimiento de población y área urbanizada del ejido de Tandil estuvo delineado por su proceso de configuración socioespacial desde su fundación en 1823.



En un inicio, la incipiente actividad agrícola ganadera y luego la extracción de rocas de aplicación junto al desarrollo del sector industrial metalmeccánico, derivaron en un incremento poblacional con la consecuente consolidación de áreas de expansión de la ciudad hacia distintos ejes de crecimiento. Este proceso ha sido determinado por las etapas de desarrollo económico acontecidas en el contexto político internacional e impactando a escala regional y local. El aumento de oferta y demanda de servicios, producto de la diversificación de actividades trazaron tres tipos de ejes de crecimiento. La construcción del Dique del Fuerte ubicado en el límite del área urbana y complementaria, hacia el S, y las obras de regulación en los arroyos Blanco y del Fuerte que atraviesan la trama urbana, fueron centrales en la configuración territorial de la ciudad. El desarrollo de la infraestructura determinó el asentamiento de la población en el interfluvio de ambas subcuencas y establecieron el crecimiento y expansión de la ciudad hacia las líneas directrices del desarrollo urbano.

El mapa n°8 muestra la expansión urbana en tres períodos 1991, 2002 y 2011. A grandes rasgos podemos observar que la ciudad se ha extendido hacia el S hasta cubrir el piedemonte de las sierras, hacia el O y E, cruzando los valles de los arroyos y, hacia el N y E, por lo que el crecimiento urbano espontáneo se identifica hacia los ejes N y E de la ciudad (Lan et al., 2010).

Mapa n°8. Expansión urbana de la ciudad de Tandil
Período 1991-2002-2011



Fuente: elaboración personal en base a Picone y Linares. (2014)⁶

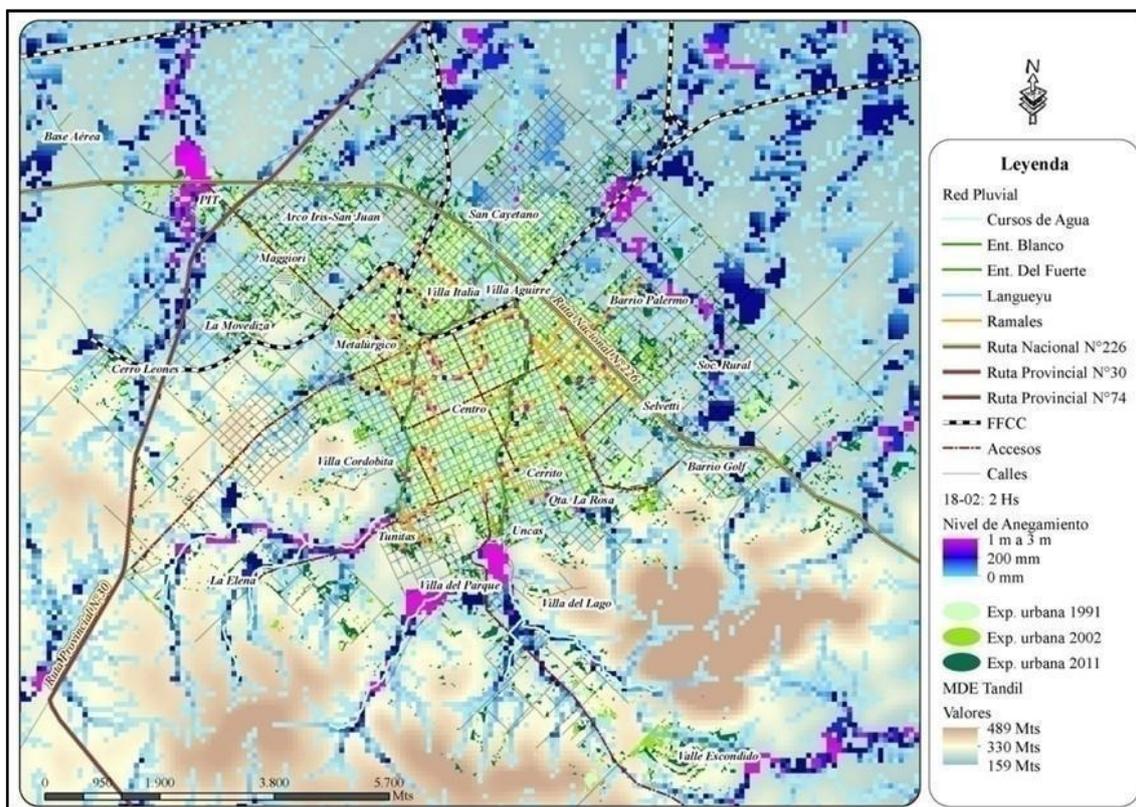
Haciendo un análisis comparativo entre el mapa n°8 de expansión urbana y el mapa n°9 que ubica las zonas con peligro de anegamiento (La Macchia, 2015) se puede demostrar la correlación directa que existe entre el crecimiento de la ciudad y la detección de zonas anegadas e inundables. El aumento de la superficie edificada y la densidad de población alteran la dinámica ambiental y el proceso de escorrentía en áreas urbanas a partir del loteo de parcelas, obras de infraestructura, apertura de calles, pavimento junto a la consecuente eliminación de vegetación y diversas tareas derivadas como el relleno y nivelación del terreno. Como consecuencia se van perdiendo superficies que retenían los excedentes hídricos y permitían un escurrimiento más lento del agua hacia las zonas

⁶ Este mapa fue elaborado a partir de los primeros resultados de la metodología aplicada en: Picone, N; Linares, S. (2014). Propuesta metodológica para la extracción y análisis de densidades urbanas mediante teledetección y SIG. Caso de estudio: ciudad de Tandil, Argentina. Revista Universitaria de Geografía. (1-2). pp. 77-96.



más bajas (Barranquero, 2015). El aumento de la superficie construida y pavimentada significa una disminución del área de infiltración, favoreciendo la acumulación de agua en las zonas más bajas y el movimiento horizontal del agua frente al vertical, en las áreas más elevadas (Guerrero, 2019), por lo cual, impacta directamente en la ecuación del balance hídrico de toda la cuenca afectando a cada uno de los componentes del ciclo hidrológico.

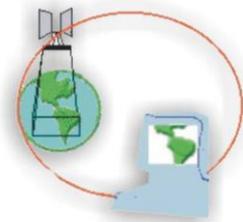
Mapa n°9. Peligro de anegamiento en la ciudad de Tandil. Evento 18/02/2012



Fuente: La Macchia. (2015)⁷

A partir de la interpretación de los mapas se pueden identificar tres grandes áreas con peligro de anegamiento. Una primera área comprende la zona N, NO y NE como ejes de crecimiento espontáneo y planificado de expansión urbana. Cada área de

⁷ Mapa síntesis resultado de la Tesis de Licenciatura en Geografía. Modelización y análisis espacial del drenaje urbano de la ciudad de Tandil mediante Tecnologías de la información Geográfica. UNCPBA. Tandil. 90 pp.



consolidación presenta particularidades producto de la diversificación de actividades y el aumento de las funciones urbanas desde la configuración del territorio. Algunas de ellas fueron el crecimiento del sector industrial metalmecánico, la localización del parque industrial, el desarrollo agroindustrial y el agronegocio en algunas vías de acceso y finalmente la conformación del polo científico tecnológico dado por la creación de la Universidad Nacional del Centro.

El crecimiento y el asentamiento de población en el período comprendido y, aún en auge, se ha dado a partir de la construcción de planes de vivienda, conjuntos habitacionales y desarrollos urbanísticos promovidos por el Estado. Estas inversiones lograron el mejoramiento de las condiciones de vida de la población por la extensión de las redes de servicios colectivos básicos, la pavimentación de vías principales y secundarias, aumentando el acceso y conexión entre barrios, y la creación de nuevos espacios verdes recreativos. La ruta nacional N°226 que constituía un patrón de segregación socioespacial dejó de ser un límite de expansión y crecimiento formando parte de la dinámica intraurbana y favoreciendo el desarrollo urbano espontáneo. Estas zonas se caracterizan por tener una densidad de población media alta a baja que se ubica en valores desde los 6.300 hab./km² hacia el NO a 5.500 hab./km² al N y luego una tendencia hacia los 2.100 y 1.100 hab./km² en el área complementaria.

En términos de anegamiento constituyen áreas de baja pendiente y escasa infiltración. En el sector N la velocidad y dinámica del escurrimiento superficial vuelve a activarse con el final del entubamiento de los arroyos Blanco y del Fuerte hacia las inmediaciones de la ruta nacional N°226, de manera que comienza a escurrir de forma abierta el arroyo Langueyú.

El NE ha experimentado un gran crecimiento hacia el último período, 2011, y continúa consolidándose en la actualidad por el flujo poblacional que genera el polo científico tecnológico. Las actividades vinculadas a la recreación y esparcimiento conforman un área de quintas, viviendas de fin de semana y complejos de cabañas asociados a la calidad paisajística y del ambiente circundante destinado al consumo de clases media alta a alta. De todos modos los problemas de anegamiento obstruyen la circulación por las calles no pavimentadas, se acumula agua en lotes bajos generando piletas y se observa agua retenida por varias horas y arrastre de material disuelto.

Una segunda área queda definida por el centro de la ciudad donde se localiza el entubamiento de ambos arroyos y se concentra la mayor dinámica y diversificación de



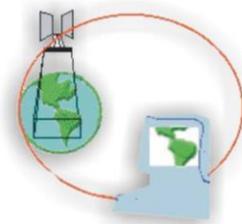
actividades urbanas. La densidad de edificación es muy alta con valores en el orden de las 5.600 viviendas por km² a densidades altas y media alta situada entre las 4.000 y 2.000 viviendas por km². La densidad de población mantiene el mismo comportamiento siendo alta con valores en algunos radios de más 6.800 personas por km² y un radio extremo que supera los 8.500 habitantes. Luego se destacan las densidades medias a medias altas ubicadas entre los 4.200 y 5.500 habitantes y los 5.500 y 6.800 habitantes por km².

Finalmente la tercera área integra el S, SO y SE de la ciudad. Esta zona ha experimentado un notable crecimiento durante el período comprendido 1991, 2002 y 2011 a partir de la construcción de conjuntos habitacionales planificados y consolidación de barrios debido al loteo y desarrollo de viviendas hacia el S-SO. Las viviendas unifamiliares y conjuntos habitacionales privados de media-alta calidad conviven con áreas recreativas. La construcción de barrios cerrados y el desarrollo de complejos hoteleros, cabañas y actividades destinadas al consumo de las clases más altas vinculadas a la calidad ambiental y el paisaje han constituido la construcción de un espacio más productivo, especulativo, dinámico e integrado al servicio de los intereses de actores privados principalmente sobre el S-SE.

El avance de la urbanización sobre el faldeo serrano genera la coexistencia de usos de suelo diversos no compatibles con la normativa de ordenamiento territorial que posee restricciones y parámetros urbanísticos precisos. El aumento de la superficie edificada y la extensión de las redes de servicios impermeabilizan los suelos, reducen la infiltración y afectan el escurrimiento natural del terreno. Estos nuevos usos del espacio peligran contra el régimen hídrico y la red de drenaje alterando el balance hidrológico de la cuenca, sus subcuencas y desviando cauces que impactan aguas abajo hacia el centro y N del área urbana.

2.2 Dimensiones de análisis y variables explicativas

A partir del paralelismo realizado entre el crecimiento urbano, el proceso de expansión urbana y las zonas con peligro de anegamiento en este apartado se intentó diagramar un esquema analítico 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 según se expone en la figura n°9.

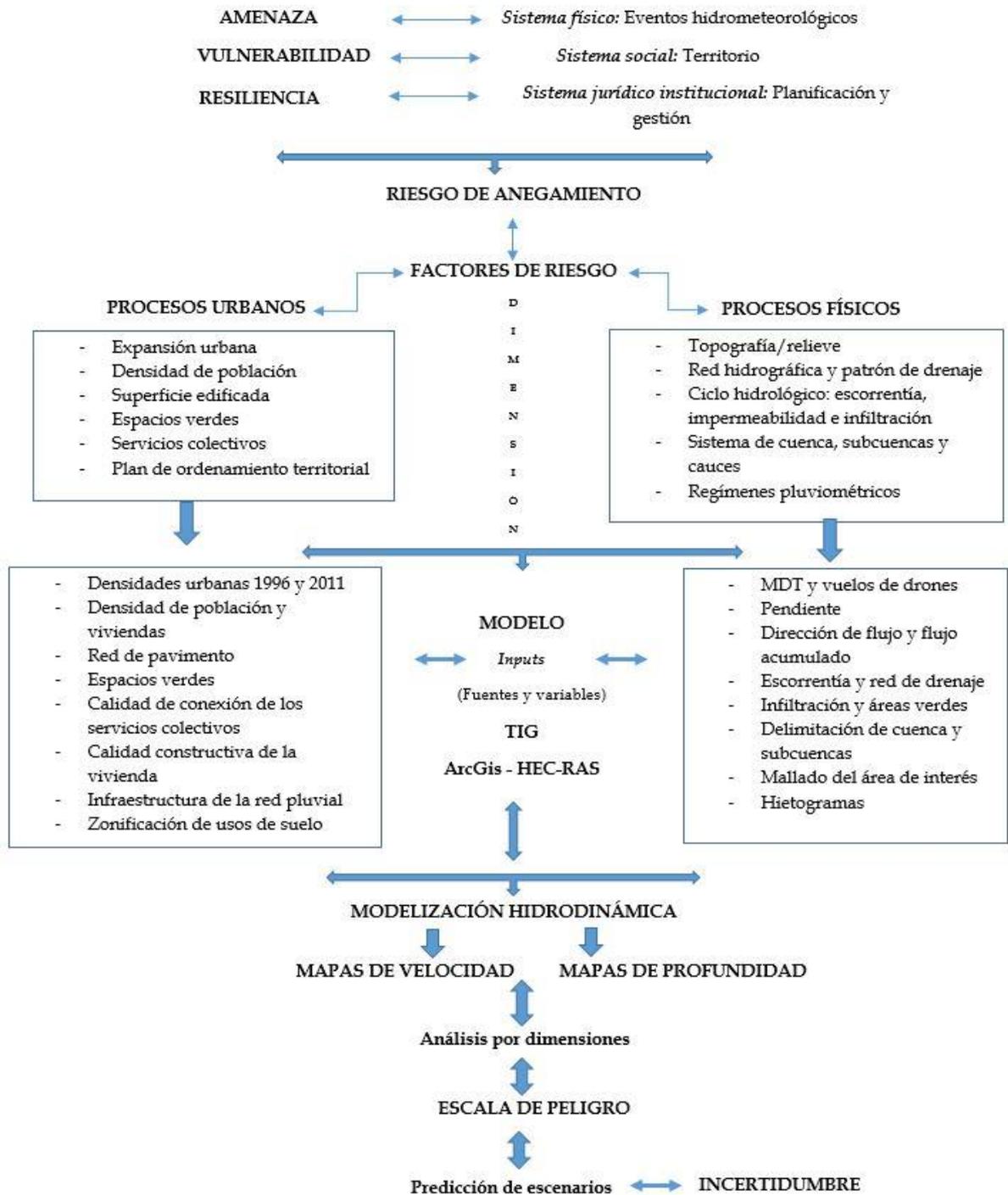


Partimos de una problemática que es pertinente poder estudiarla desde su complejidad integrando cada uno de los subsistemas en conflicto y el enfoque desde el paradigma del riesgo delineando y asociando cada una de sus dimensiones. En un primer momento se identifica el sistema físico como parte de la 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 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).

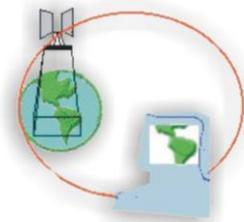
En un segundo momento se especifican los factores de riesgo en áreas urbanas dividiéndolos en dos tipos: los procesos urbanos y los procesos físicos. Los indicadores de ambos procesos fueron analizados en el apartado anterior correlacionando las zonas de peligro a partir de las áreas de crecimiento espontáneo, planificado y las que resultan inducidas por la especulación de mercado inmobiliario.



Figura n°9. Esquema analítico para la elaboración del modelado hidrológico



Fuente: elaboración personal



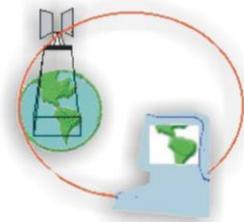
En un tercer momento se ubica la transformación de los procesos tanto urbanos como físicos en fuentes, variables e indicadores del modelo analítico. Desde el aporte de las geotecnologías, la herramienta ArcGIS permitirá preprocesar y procesar los inputs del modelo hidrológico - hidráulico para luego integrarlos al entorno de HEC-RAS. 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. El post procesamiento 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. 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 a variables urbanas y parámetros hidrológicos.

Los resultados arribados a partir de las modelizaciones obtenidas mediante la utilización del programa AQUA II⁸ y analizados a grandes rasgos en el apartado 2.1.2 fueron satisfactorios para un primer abordaje del problema, teniendo en cuenta la escala de trabajo utilizada en la predicción de zonas potencialmente inundables y el nivel de abstracción en los resultados. Las restricciones derivadas del comportamiento de la red de infraestructura pluvial, la reasignación de valores de los píxeles del DEM de 90 metros dentro del modelo de precipitación e infiltración definieron distintos escenarios en la simulación del escurrimiento superficial para los eventos registrados en el período 2011/2012⁹.

⁸Programa desarrollado por el PLADEMA-UNCPBA con soporte del Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA-UNCPBA) para modelizar el proceso de escurrimiento/escorrentía en terrenos de llanura. El equipo de trabajo involucra a los investigadores: D. Dalponte, P. Rinaldi (PLADEMA-ISISTAN-CICPBA) G. Cazenave, E. Usunoff, L. Vives, M.Varni, (IHLLA-CICPBA) M. Venere y A. Clausse (CNEA-CONICET).

⁹ Base de datos: Picone, N (2014). Registro de lluvias de 10 estaciones pluviométricas distribuidas en la ciudad y los datos de precipitaciones derivados de la estación meteorológica Tandil-AERO.



Los escenarios de anegamiento resultantes en el área urbana y complementaria requiere 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. Una primera zona intenta reflejar las características del área central altamente densificada; la segunda y la tercera reflejan el comportamiento del área de influencia del Ramal H hacia el SE y el Dique del Fuerte al S; y la cuarta integra un área de crecimiento y expansión urbana espontánea al N hacia la confluencia del entubamiento y el escurrimiento abierto del arroyo Langueyú.

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.

A continuación se presentan cada una de las dimensiones del modelo analítico junto con la obtención de sus variables, las fuentes utilizadas para su confección y preprocesamiento y su interpretación en el marco de la gestión del riesgo para el área de estudio.

2.2.1 Modelos Digitales de Elevación (DEM) y tecnologías de precisión para la simulación de procesos hidrológicos y mitigación de inundaciones en áreas urbanas

El aporte de las TIG y la utilización de DEM para reproducir el comportamiento de algunas de las características de la realidad requiere discriminar cuáles serán los elementos que definirán la producción de una cartografía de riesgo y determinar una escala de trabajo adecuada para la problemática que se intenta abordar teniendo en cuenta la sensibilidad y abstracción en los resultados. Al tratar exclusivamente de la distribución espacial de variables cuantitativas y continuas, los DEM pueden considerarse una potencialidad relativamente reciente y de gran trascendencia por la entrada de nueva información en los procesos de modelización cartográfica (Sánchez



Martínez y Lastra Fernández, 2011). Del mismo modo, el desarrollo de aplicaciones bajo el uso de tecnologías de alta precisión como los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) o *unmanned aerial vehicle* (UAV) denominados drones, han significado un gran desafío en las investigaciones aplicadas de todo tipo.

El levantamiento topográfico de un área de interés a partir del uso de cámaras y nuevos sensores en combinación con el procesamiento posterior en software compatibles permiten un estudio más exhaustivo en el análisis de cuencas urbanas para la obtención de mapas de peligrosidad y exposición sobre temáticas vinculadas a la gestión y mitigación de inundaciones. La topografía con drones permite generar diferentes tipos de datos de gran utilidad en numerosos sectores con el objetivo realizar tareas de reconocimiento, fotogrametría, cartografía 3D, levantamientos altitudinales, y análisis de velocimetría. La información obtenida es esencial para tomar decisiones desde la planificación de una obra, el monitoreo de un cauce o la subdivisión catastral hasta el diseño y el mantenimiento de infraestructuras.

Los antecedentes bibliográficos que trabajan la potencialidad del uso de modelos para la gestión de inundaciones en Sánchez Martínez y Lastra Fernández (2011), Felicísimo (1994 y 1999), Pusineri et al., (2005) y Guth et al., (2021) permiten distinguir algunas diferencias entre la utilización de un DEM a DSM o DTM según el abordaje del problema de estudio, la escala de trabajo y el preprocesamiento que se requiera sobre ellos.

En líneas generales un DEM es un término genérico, y términos más específicos como DSM o DTM registran el tratamiento de las superficies intermedias. No todos los DEM comparten el mismo datum vertical, no todos usan la misma convención para el área en el suelo representada por cada píxel en el DEM, y algunos de ellos tienen espaciados de datos variables dependiendo de la latitud (Guth et al., 2021; p.1).

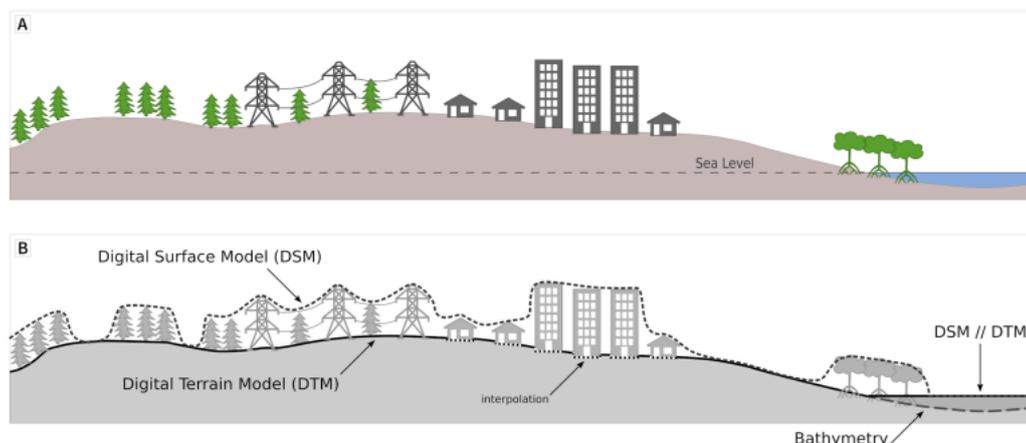
Un DEM constituye una matriz de celdas de tierra desnuda referida a un dato vertical donde los edificios construidos (líneas eléctricas, edificios y torres) y naturales (árboles y otros tipos de vegetación) no están incluidos. Constituyen cuadrículas regulares, curvas de nivel digitales o redes irregulares trianguladas que solo representan las elevaciones del terreno. Estos modelos son ampliamente utilizados en la modelización hidrológica para detectar las redes de drenaje dentro de una cuenca hidrográfica y el mapeo de usos de suelo, cartas geológicas o geomorfológicas.



Un DSM, según la figura n°10, representa las elevaciones sobre el nivel del mar de las superficies reflectantes de árboles, edificios y otras características elevadas sobre la tierra desnuda, por lo cual, la variación de altura puede expresar la parte superior de los edificios, el tapiz arbóreo, las líneas eléctricas y otras características. En definitiva un DSM captura y muestra las características naturales y construidas en la superficie de la tierra. Solo en las áreas donde las características que no son del suelo no están presentes, como un césped bien mantenido, el DSM incluirá puntos del suelo.

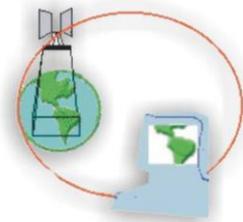
Finalmente un DTM puede describirse como una representación tridimensional de una superficie del terreno consistente en coordenadas X, Y, Z almacenadas en forma digital. Incluye no sólo alturas y elevaciones, sino también otros elementos geográficos y características naturales como ríos, líneas de crestas, etc. La mayoría de los atributos DTM se pueden calcular a partir de DEM, es decir, conforma efectivamente un DEM que se ha incrementado con elementos representativos del terreno y que tienen una función dentro del procesamiento. En algunos países, un DTM es sinónimo de DEM considerándolo como una superficie de elevación que representa la tierra desnuda referenciada a un dato vertical común (Felicísimo, 1999), mientras que en otros, un DTM aumenta un DEM incluyendo características lineales y otro tipo de entidades que definen el terreno sobre la tierra desnuda.

Figura n°10. Técnicas de filtrado en DSM para obtener un DTM



Fuente: Guth et al. (2021)

La distinción, diferenciación y selección del modelo a trabajar es muy importante, ya que demanda un tipo de procesamiento posterior a su obtención según el sensor



utilizado (LIDAR, SRTM, ASTER GDEM) y los métodos de procesamiento de datos. Algunos de ellos dependen del tipo de representación, los parámetros de calibración y corrección, la escala de análisis y la configuración de los elementos naturales y construidos que serán objeto de la simulación.

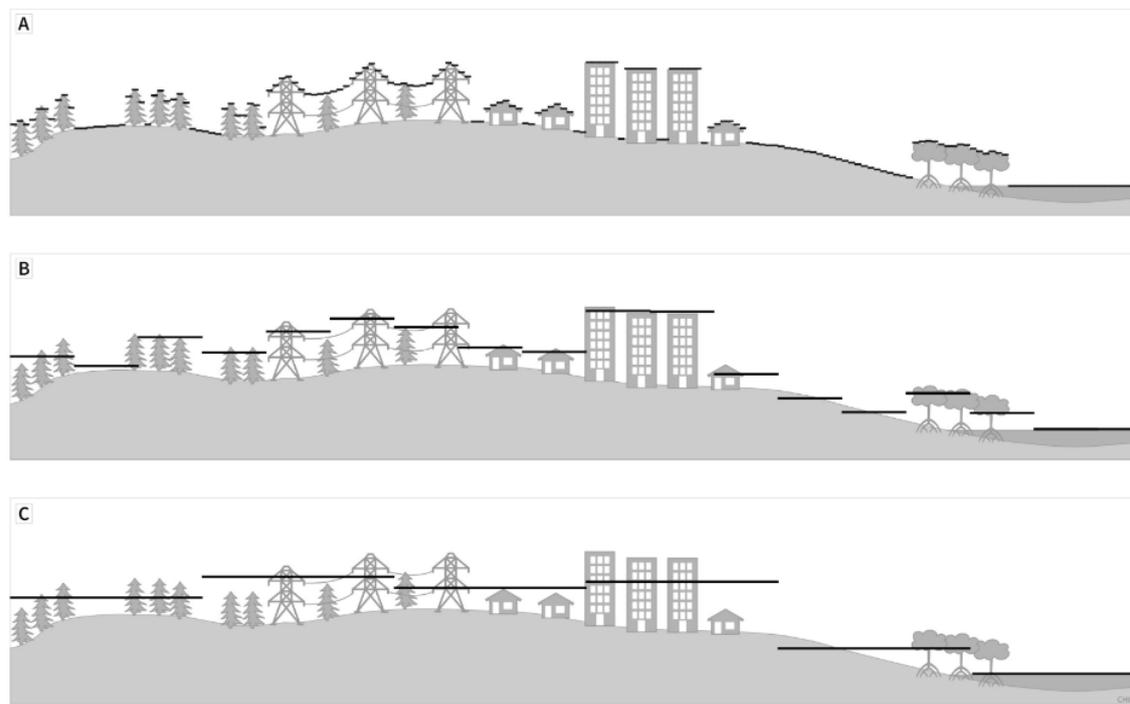
En Guth et al., (2021) se señalan diferentes tipos de operaciones de modificación de DEM según los sensores utilizados para reconstruir el que mejor se adapte a nuestro esquema de trabajo. Aquí entran a considerarse la definición de tamaño de pixel y la resolución espacial. Los primeros pasos en la edición DEM intentan eliminar o corregir los efectos relacionados con el sensor, como los vacíos de datos o los artefactos relacionados con el agua. Las evaluaciones de la calidad del DEM deben evitar las áreas que se cambiaron para llenar vacíos o por ediciones de edificios o agua, aunque sería deseable informar el porcentaje del área llena de vacíos o ediciones de edificios/agua.

Los DEM se pueden modificar para fines particulares, como la geomorfometría, la eliminación de sumideros y la aplicación del flujo hidrológico, o el aplanamiento de masas de agua o para la producción de productos derivados (por ejemplo de DSM a DTM). “Las aplicaciones hidrológicas prefieren un DTM, que puede requerir la aplicación de drenaje pero, dependiendo de la escala, pueden combinarlo con edificios agregados localmente a partir de un producto 3D o de un DSM con un espaciado de cuadrícula más fino” (Guth et al., 2021; p.13). Aunque un tamaño de píxel más pequeño no siempre equivale a una resolución espacial más alta, generalmente se prefieren DEM de tamaño de píxel más pequeño para la mayoría de las aplicaciones, ya que dichos conjuntos de datos pueden acomodar potencialmente detalles más finos. Las diferencias entre los DEM, DSM y DTM son muy útiles teniendo en cuenta la precisión de la escala de trabajo y, en ese caso, si optamos por estudios hidráulicos o hidrológicos.

La figura n°11 muestra los cambios en un DEM, en este caso un DSM que promedia la superficie, a medida que aumenta el espaciado de la cuadrícula. En primer lugar en (A) se observa un espacio de cuadrícula de 1 a 2 m desde LIDAR; en (B) 30 m y en (C) 90 m, donde una elevación representa la celda completa y depende del método de medición (Guth et al., 2021; p.14). Los tamaños de cuadrícula grandes producen un mayor promedio, perdiendo las elevaciones altas y bajas y conduciendo las elevaciones hacia la media.



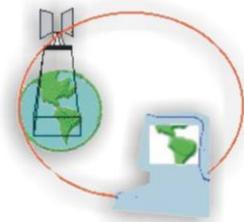
Figura n°11. Naturaleza escalonada de las cuadrículas DEM con un espaciado de cuadrícula creciente



Fuente: Guth et al. (2021)

En modelización hidrológica y cartografía de riesgo de inundaciones el estudio del terreno y la obtención de nuevos parámetros morfométricos constituyen una pieza fundamental del análisis espacial geográfico.

Los sistemas de información geográfica manejan información territorial de diversos tipos, en función de los modelos de datos y de la naturaleza de las variables. En esta investigación nuestro interés radica en la construcción de un modelo hidrológico e hidráulico que tiene como principal información de entrada un DTM. Como se mencionó anteriormente el DTM parte de información extraída de un DEM y de la combinación de una serie de inputs que integran parámetros hidrológicos de la cuenca urbana y los procesos que ocurren en el medio construido según las dimensiones del modelo de datos presentado. Aquí se define el punto de partida para configurar el modelo hidrológico hidráulico y predecir los escenarios de simulación dentro del entorno de las TIG.

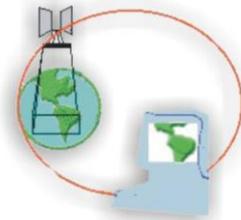


Las ventajas ofrecidas por la utilización de los modelos de simulación para representar la estructura y funciones del sistema urbano ha tenido gran desarrollo en las últimas décadas, principalmente, en ámbitos de la planificación urbana y regional, en la asignación de recursos, en la predicción de fenómenos urbanos y ambientales y en la búsqueda de soluciones a problemas socioespaciales como ayuda a la toma de decisiones. “Se construyen con el fin de contribuir a la solución de un problema concreto a partir de hacer predicciones, analizar tendencias de evolución para determinadas magnitudes que permita hacer previsiones más que predicciones y emplearlos como instrumentos para analizar los distintos modos de comportamiento que puede tener un sistema” (Linares, 2012.p. 22).

El estudio de las ciudades y el análisis de cada uno de sus procesos urbanos y físicos en la configuración socioespacial del territorio forman parte de los subsistemas que determinan la construcción del modelo. Por ello cada una de las dimensiones y variables del esquema de datos tienen una función que se logrará parametrizar y configurar según los escenarios de predicción simulados.

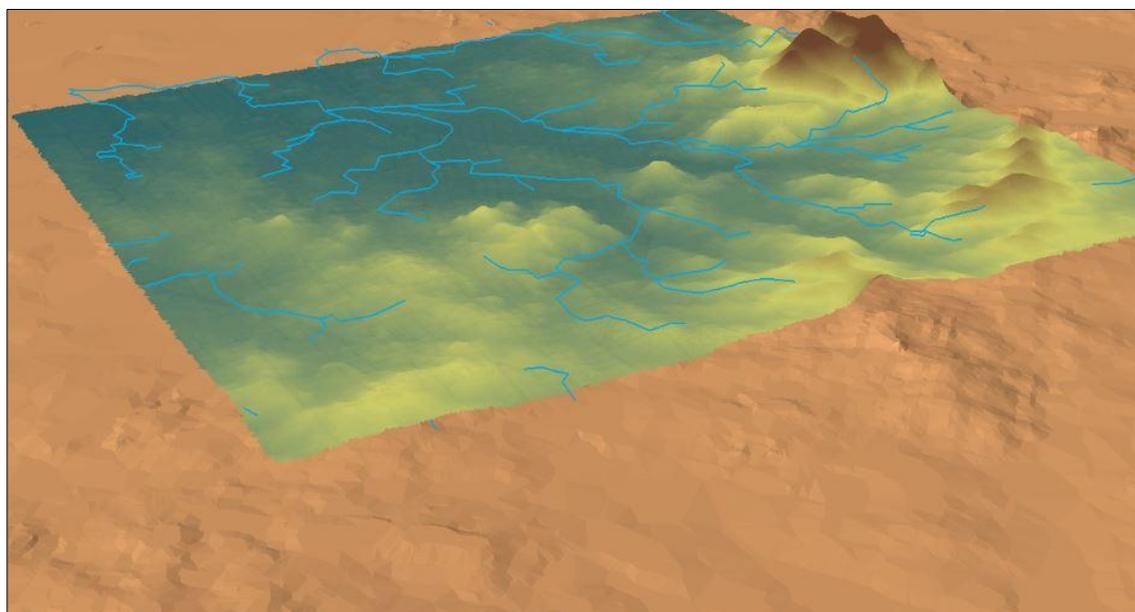
En esta línea a lo largo de investigaciones precedentes en La Macchia (2015), Scioli (2009) y trabajos como el de Collazos et al., (2018), Fajardo et al., (2017), Pusineri et al., (2005), Weng (2001) y Rinaldi et al., (2019) se analiza el aporte de los DEM y las potencialidades para extraer información derivada para el estudio del terreno. Existe un gran abanico de aplicaciones y herramientas en torno al procesamiento de la información con el objetivo de simular o modelar determinados aspectos del terreno, interpretar eventos concretos y determinar áreas vulnerables o de riesgo dentro de las tecnologías de geoprocésamiento disponibles en los Sistemas de Información Geografía (SIG).

Para la detección de zonas anegadas e inundables es fundamental contar con la información de productos teledetectados para obtener las variables de interés que luego se procesarán y configurarán dentro del modelo hidrológico hidráulico a partir de las TIG. Haciendo un recorrido de su utilización mediante la obtención y mejora de nuevos productos, en primer lugar, se seleccionó un DEM para definir la topografía del área de estudio y la escala de trabajo sobre la cual se obtuvieron algunas dimensiones y variables del terreno para el procesamiento y la simulación de procesos hidrológicos. A



escala local se ha trabajado diversos productos SRTM¹⁰ de 90 y 30 metros de resolución espacial como así también se han probado modelos ASTER - GDEM de 30 m (La Macchia, 2015). Si bien cada uno de ellos presenta datos anómalos, imperfecciones que requieren un ajuste previo, se recurrió a utilizar el más adecuado a pesar de sus limitaciones para garantizar su aplicación. En este punto nos referimos a que los productos obtenidos reflejen a escala real la hidrografía y la red de drenaje del lugar. En este caso la extracción de los parámetros morfométricos necesarios se llevó a cabo mediante el modelo ALOS PALSAR SRTM de 12.5 m¹¹ según la figura n°12. El ALOS *Advanced Land Observation Satellite* (PALSAR DEM) posee tres sensores: el PRISM para imágenes pancromáticas, el radar de apertura sintética PALSAR y el radiómetro AVNIR y es uno de los múltiples recursos cartográficos disponibles dentro de los productos del satélite ALOS de Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA) que adquirió imágenes radar entre 2006 y 2011.

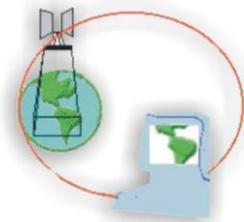
Figura n°12. DEM de la circunscripción I de la ciudad de Tandil



Fuente: Elaboración personal

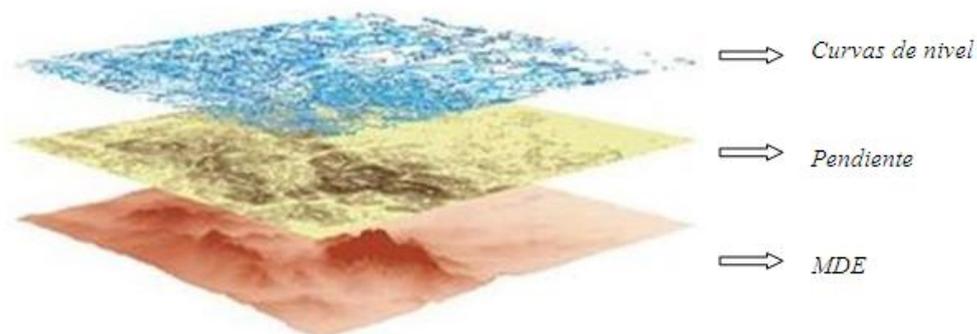
¹⁰ Disponible en: <http://earthexplorer.usgs.gov/>

¹¹ Corresponde a una versión remuestreada del modelo ALOS PALSAR DEM de 30 m. Disponible en: <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/#>



A modo de síntesis la aplicación de las herramientas de análisis de superficie y modelado de variables hidrológicas que disponen las tecnologías de la información geográfica fueron de gran utilidad para extraer información de los DEM y procesar variables continuas más complejas. Siguiendo esta línea se obtuvieron mapas morfométricos derivados de la información contenida explícita o implícitamente en el DEM. Las técnicas aplicadas se encuentran incorporadas en rutinas de ArcGIS dentro del módulo de análisis de superficies (*Surface*). Los mapas más sencillos reflejan características morfológicas simples (pendiente, curvas de nivel, orientación, curvatura, rugosidad, etc.). En la figura n°13 se observan la obtención de curvas de nivel y la pendiente del terreno.

Figura n°13. Parámetros morfométricos del DEM



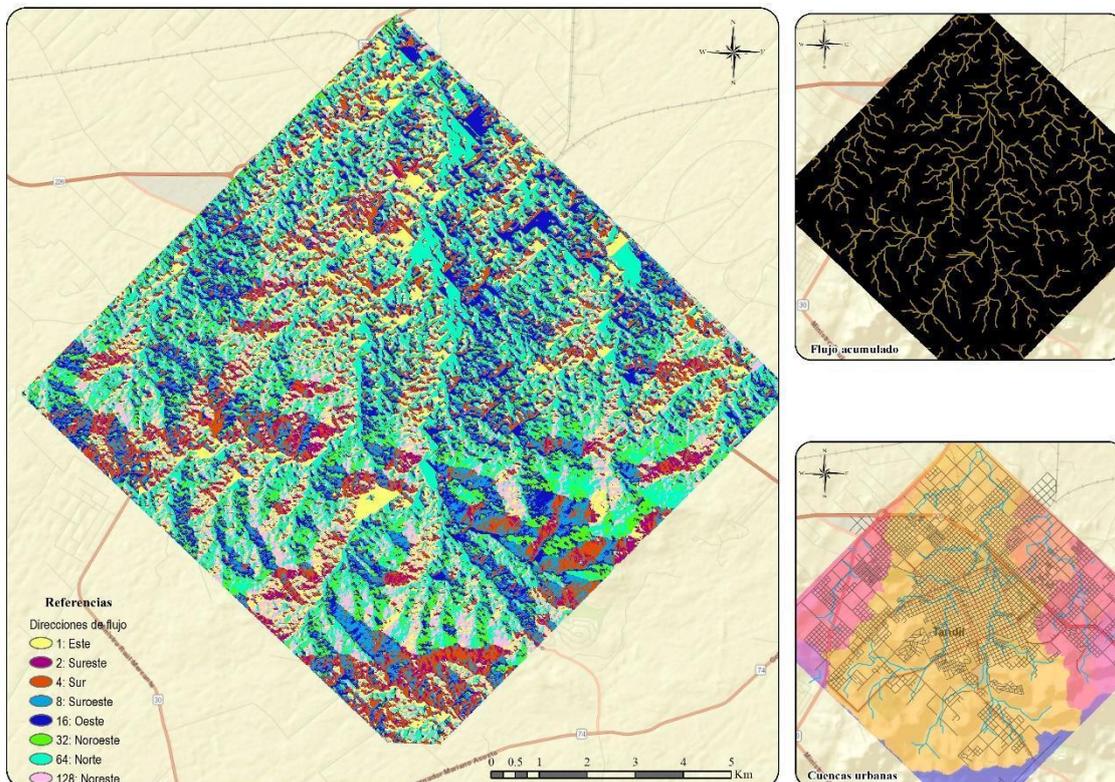
Fuente: Elaboración personal

Posteriormente para el modelado de variables hidrológicas y la simulación de procesos físicos que intervienen en una cuenca urbana se utilizó la caja de herramientas de ArcGIS provista por el módulo de hidrología (*Hydrology*). La información implícita que puede extraerse de un DEM está asociada a la obtención de cuencas urbanas, la delimitación de subcuencas, la determinación de la red de drenaje y la obtención de parámetros hidrológicos asociados como la dirección de flujo y flujo acumulado en un área de la cuenca hidrográfica (La Macchia, 2015).



El Mapa n°10 hace referencia a la obtención de propiedades de la red de drenaje superficial como la dirección de flujo, la red de drenaje y la delimitación de cuencas urbanas. Estas aplicaciones determinan la escorrentía superficial sobre el terreno (desde las celdas más altas hacia las celdas vecinas) donde las líneas de flujo siguen la línea de máxima pendiente y finalizan en las supuestas desembocaduras (concavidad topográfica). El cálculo del flujo acumulado conlleva a sumar la dirección de flujo de todas las celdas y mediante la acumulación del peso de todas las celdas hacia abajo se obtiene el resultado.

Mapa n°10. Propiedades del proceso de escorrentía urbana (sin edificios)

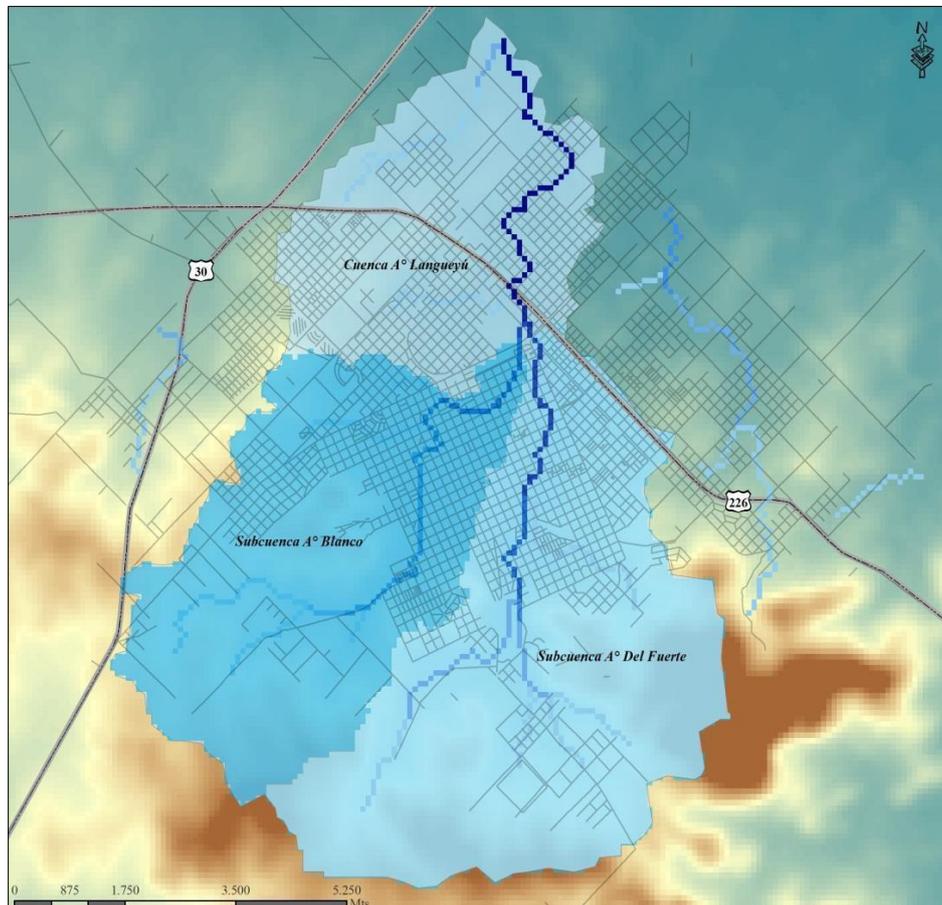


Fuente: Elaboración personal

Finalmente complementando el mapa anterior se llevó a cabo la delimitación de subcuencas urbanas mediante la combinación de las herramientas (*Basin y watershed*) del mismo módulo de hidrología que se presenta a continuación en el mapa n°11.



Mapa n°11. Subcuencas del arroyo Langueyú en la circunscripción I



Fuente: Elaboración personal

En segundo lugar, si bien este modelo continúa reproduciendo los errores de modelos originales y sumando imperfecciones, el desafío que se intenta superar es la posibilidad de mejorar los resultados de las modelizaciones con una mayor resolución espacial utilizada en las aplicaciones.

El aporte brindado por el auge y uso de las tecnologías de precisión como las imágenes de alta resolución obtenidas por los vuelos de drones constituye un escenario propicio para la calibración, ajuste y validación de los resultados. La escala de trabajo por debajo de los 5 cm¹² para detectar, analizar, monitorear y mitigar las zonas anegadas e inundables en cuencas urbanas es de gran aplicabilidad y transferencia en

¹² *Average Ground Sampling Distance (GSD)* o distancia promedio de muestreo en tierra según los reportes de calidad de los software de fotogrametría utilizados.



innumerables áreas temáticas interdisciplinarias favoreciendo la toma de decisiones en ordenamiento y planificación territorial. Es necesario aclarar que estos productos se utilizaron en la última etapa de la investigación pudiendo volar y procesar tres zonas de la ciudad y evaluar el error obtenido durante su ejecución para finalmente poder corregir en una siguiente etapa de la investigación las inconsistencias del DEM SRTM. La primera zona se ubicó en un área urbana coincidente con el barrio Jardín con un total de 34,30 ha; y las dos restantes, fueron delimitadas por las obras de ingeniería que configuran la ciudad. El Dique del Fuerte con un total de 10,46 ha y el ramal H con 45 ha. La selección de las áreas a volar dependió de su importancia en la detección de zonas anegadas y su comportamiento en la dinámica del escurrimiento durante el desarrollo de eventos de distinta intensidad. Los drones que se utilizaron para ello fue un DJI Mavic 2 con una cámara *FC220_4.7_4000x3000 (RGB)* y un DJI Phantom 4 Advance con una cámara *FC6310_8.8_5472x3648 (RGB)*. Aproximadamente volaron a una vertical (Z) de 100/115 metros en el primero y 90 metros en el segundo con una distancia de muestreo promedio del suelo (GSD) entre 2.47 cm, 2.90 cm y 3.43 cm. El número de fotos que se capturaron con ambas cámaras fueron de 188 para la zona urbana (Bo. Jardín), 389 para el Dique del Fuerte y 591 para el ramal H. Las tres zonas fueron procesadas por dos software de fotogrametría, el *PIX4Dmapper (PIX4D)*¹³ como se presenta en la figura n°14 y el programa de código abierto *Open Drone Map (ODM)*¹⁴ tal como queda representado en la figura n°15, obteniendo como resultado los DTM, los DSM, la nube de puntos, las curvas de nivel y los ortomosaicos correspondientes.

¹³ <https://www.pix4d.com>

¹⁴ <https://opendronemap.org/>



Figura n°14. Ejemplo de procesamiento en PIX4D. Dique del Fuerte



Fuente: Elaboración personal

Figura n°15. Ejemplo de procesamiento en ODM (consola). Dique del Fuerte

```
ODM Console - run opendronemap --project-path E:\ODM-RESID\Dique --dtm --dsm
[INFO] split_overlap: 150
[INFO] texturing_keep_unseen_faces: False
[INFO] texturing_single_material: False
[INFO] texturing_skip_global_seam_leveling: False
[INFO] texturing_skip_local_seam_leveling: False
[INFO] tiles: False
[INFO] use_3dmesh: False
[INFO] use_exif: False
[INFO] use_fixed_camera_params: False
[INFO] use_hybrid_bundle_adjustment: False
[INFO] video_limit: 500
[INFO] video_resolution: 4000
[INFO] =====
[INFO] Running dataset stage
[INFO] Loading dataset from: E:\ODM-RESID\Dique\opendronemap\images
[INFO] Loading 389 images
[INFO] Wrote images database: E:\ODM-RESID\Dique\opendronemap\images.json
[INFO] Found 389 usable images
[INFO] Finished dataset stage
[INFO] Running split stage
[INFO] Normal dataset, will process all at once.
[INFO] Finished split stage
[INFO] Running merge stage
[INFO] Normal dataset, nothing to merge.
[INFO] Finished merge stage
[INFO] Running opensfm stage
[INFO] Maximum photo dimensions: 4000px
[INFO] Photo dimensions for feature extraction: 2000px
[INFO] CUDA drivers detected
```

Fuente: Elaboración personal



Los procesamientos en ambos software se ajustaron según los parámetros de configuración de las distintas salidas y se aplicó un filtro de vegetación. En general y dependiendo de los objetivos de cada aplicación, la utilización de filtros resultan interesantes a la hora de analizar anegamientos e inundaciones en áreas urbanas. Se pueden parametrizar muchos indicadores y opciones para la generación de las salidas¹⁵, siendo central el ajuste de algunos filtros como la variación de altura en el terreno (*smrf-scalar*) cuyo valor por defecto es de 1,25; asignar una tolerancia en la pendiente (*smrf-slope*) desde un valor aceptable de 0,1 y no superior a 1,2; establecer un umbral de elevación para determinar la altura mínima que se espera que tengan los objetos que no están en el suelo (*smrf-threshold*), asignando un valor a partir de 0,5 o eliminar (*smrf-window*) edificios, copas de árboles o cualquier objeto que interfiera en la construcción de los modelos, establecido desde un valor superior a 10. En este último caso se ajustó este parámetro reasignando el valor por defecto de 18 a 30.

El mapa n°12 y el mapa n°13 presentan las salidas de los ortomosaicos de las tres zonas seleccionadas y la obtención de los DTM para cada vuelo.

¹⁵ <https://docs.opendronemap.org/es/arguments/>



Mapa n°12. Ortomosaicos en zonas de interés



Referencias

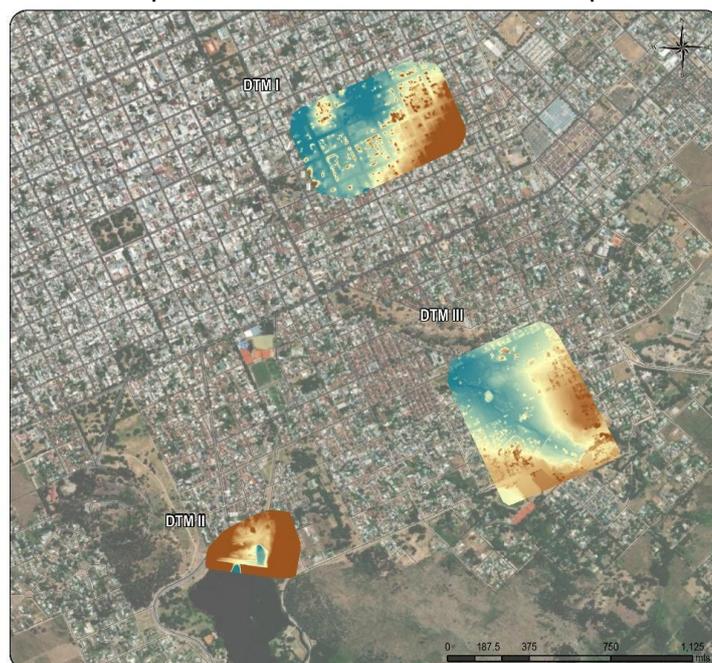
Vuelo I: Área urbana: Bo. Jardín

Vuelo II: Dique del Fuerte

Vuelo III: Ramal H

Fuente: Elaboración personal

Mapa n°13. Generación de los DTM para las zonas de interés



Referencias

DTM I: Área urbana. Bo. Jardín

Altitud
 176.822 mts.
 172.46 mts.
 169.134 mts.

DTM II: Dique del Fuerte

Altitud
 200.18 mts.
 196.453 mts.
 192.532 mts.

DTM III: Ramal H

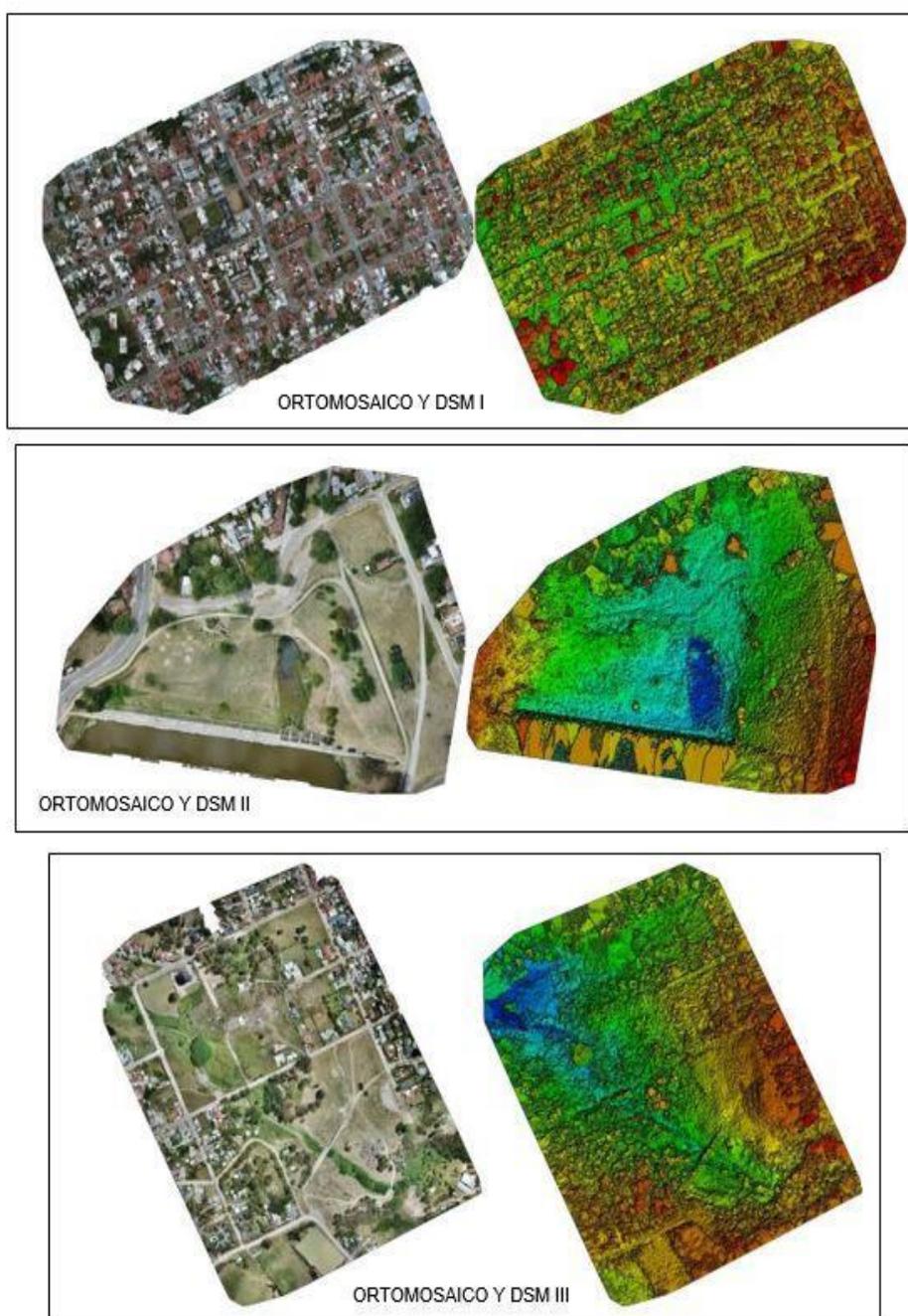
Altitud
 228.43 mts.
 195.532 mts.
 173.3 mts.

— Red vial

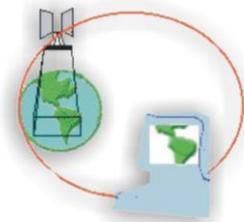
Fuente: elaboración personal

Asimismo a partir del reporte de calidad extraído del software utilizado podemos observar mediante la figura n°16 la representación de cada uno de los DSM.

Figura n°16. Ortomosaicos y DSM de las zonas de interés

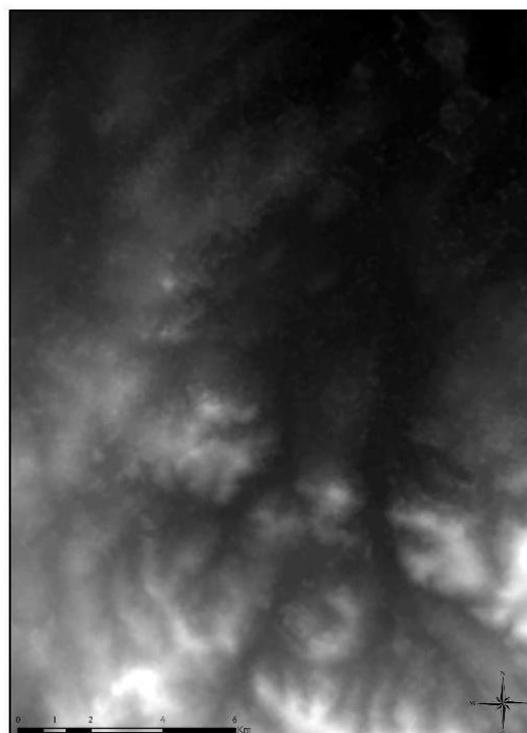
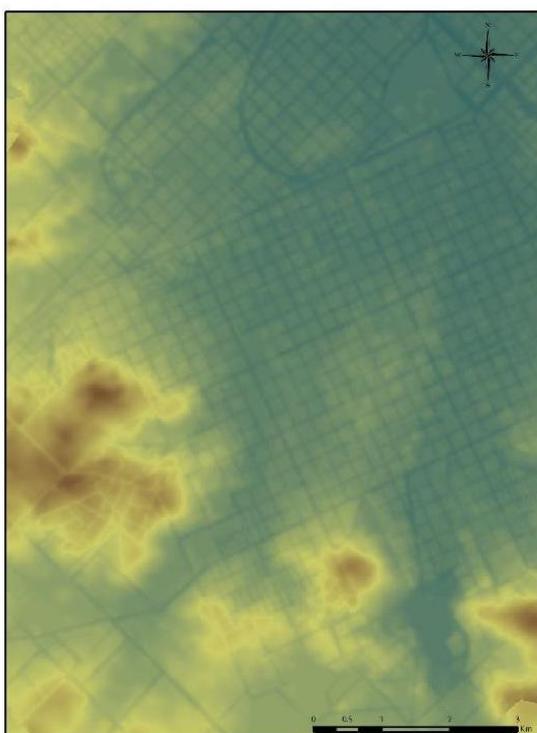


Fuente: elaboración personal en base a software PIX4D

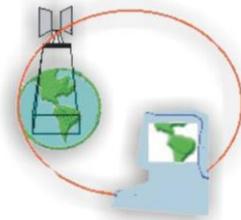


En tercer lugar, el siguiente paso fue ajustar y calibrar los DTM obtenidos para lograr una evaluación de las imperfecciones del modelo original que se desprende el SRTM ALOS PALSAR. Como se detalló en la primera parte de este apartado, a partir del DEM de 12,5 metros se obtuvieron mapas derivados de la red de drenaje y los parámetros morfométricos del análisis de superficie. A su vez, este modelo sirvió como base para poder integrar el catastro de la circunscripción I mediante algunas herramientas de geoprocésamiento. El objetivo que se persiguió fue determinar el amanzanamiento y eje de calles asignando una elevación a las manzanas (5 metros) para que durante la simulación el escurrimiento pueda visualizarse y forzarse hacia la dirección de la pendiente. El mapa n°14 muestra el procedimiento aplicado y como se visualiza la restricción integrada en un nuevo modelo digital del terreno modificado.

Mapa n°14. DTM modificado y SRTM original



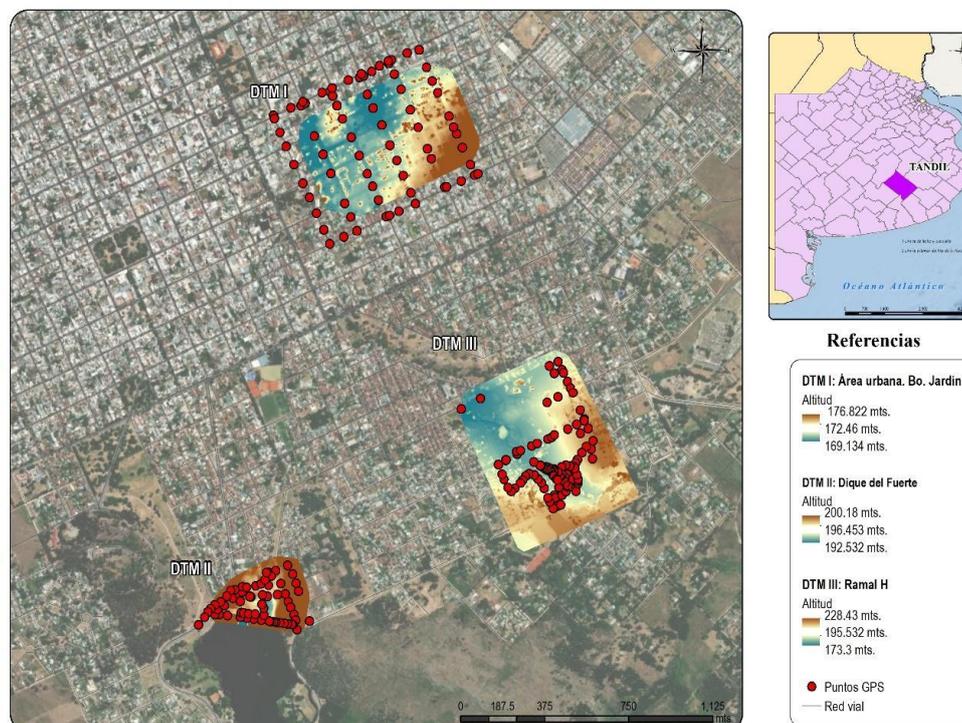
Fuente: elaboración personal



De esta manera queda configurado el input principal para llevar a cabo las simulaciones. Si bien la construcción del producto arrastra inconsistencias e imperfecciones desde el origen de la fuente de datos hasta su manipulación dentro del software, los errores pueden corregirse ajustando la altura del DEM usando múltiples fuentes de información, como mapas topográficos, imágenes satelitales, métodos de interpolación y vectores tomados por posicionamiento global diferencial (GPS) en carreteras, depresiones y canales (Guevara Ochoa et al., 2019).

La ejecución de los vuelos y su procesamiento posterior en los programas de fotogrametría requiere una etapa de calibración final para ajustar el modelo en forma precisa. La falta de instrumental adecuado para ello determinó, en cuarto lugar, la toma de puntos de control con un GPS GARMIN, como puede apreciarse en el mapa n°15. Su distribución espacial dentro de las áreas de vuelo permitió seleccionar aquellos puntos de cota conocida que deberían ser recolectados por un GPS geodésico diferencial para evaluar su exactitud. En el mapa n°16 se reflejan los puntos que definirán cada una de las zonas relevadas.

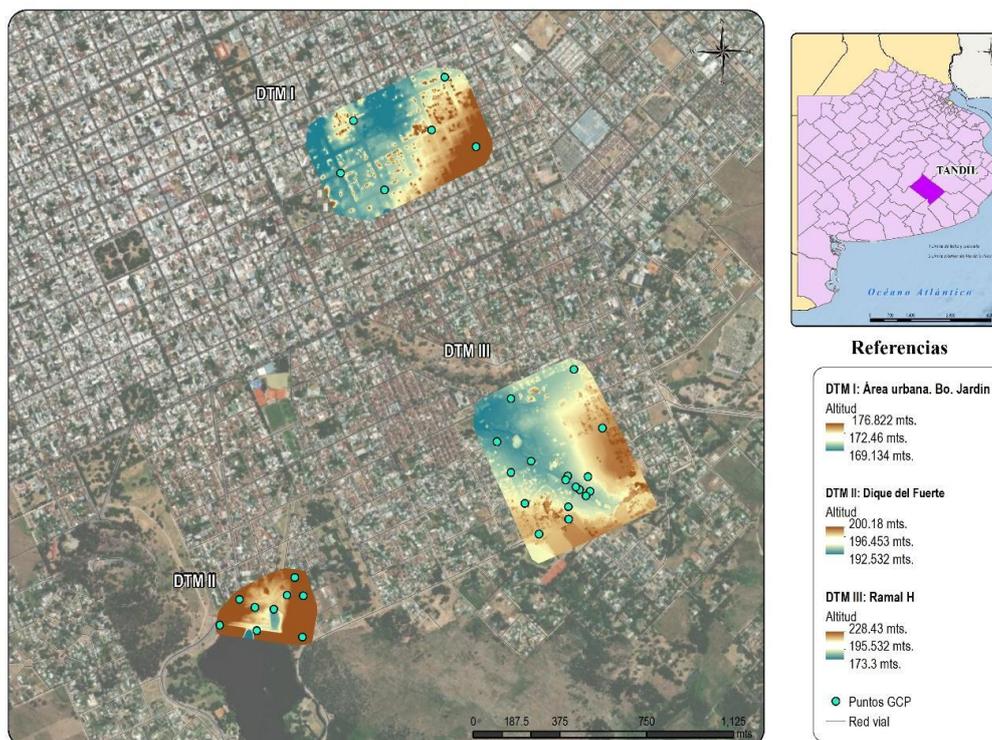
Mapa n°15. Toma de puntos de control mediante GPS



Fuente: elaboración personal



Mapa n°16. Selección de puntos GCP para la calibración del modelo



Fuente: elaboración personal

Más allá que se requiera, en una siguiente etapa de esta investigación, la toma de puntos de control con un GPS geodésico, este proceso fue muy importante, ya que se pudo lograr la evaluación del error en cada uno de los DTM mediante el análisis de Pell et al., (2022). Este trabajo analiza las fortalezas y debilidades en la utilización de diferentes paquetes de software para el procesamiento de drones en cada una de sus salidas. En este caso se comparó cada uno de los DTM por el coeficiente de correlación de Spearman, una medida de correlación (asociación o interdependencia) entre dos variables aleatorias (tanto continua como discreta).

El procedimiento que se aplicó consistió en construir una tabla de información cruzando los puntos GPS entre pares de DTM. De esta manera se evaluó el error absoluto medio (MAE) y el error cuadrático medio (RMSE) según se muestra en la figura n°17. El primero mide el promedio de las diferencias absolutas entre dos capas del DTM, donde todas las diferencias individuales tienen el mismo peso y el segundo la magnitud



promedio del error siendo la raíz cuadrada del promedio de las diferencias al cuadrado entre dos observaciones. La combinación de MAE y RMSE proporcionará la varianza de la diferencia (es decir, todos los píxeles tienen una diferencia relativamente uniforme o no) entre dos DTM (Pell et al., 2022).

Figura n°17. Ecuaciones para cálculo de errores

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |a_i - b_i|}{N - 1}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (a_i - b_i)^2}{N - 1}}$$

Fuente: Pell et al., 2022

Dónde a_i, b_i son los valores de píxel (es decir, la elevación o altura) en la misma ubicación de los DTM a comparar y N es el número total de píxeles superpuestos.

La tabla n°1 resulta del cruce de todos los modelos: el SRTM original, el SRTM modificado y el procesado por cada uno de los vuelos. La totalidad de puntos que se tuvieron en cuenta para el planteo de las ecuaciones propuestas por Pell et al. (2022) fueron 28 para el área urbana (Bo. Jardín), 55 para el Dique del Fuerte y 106 para el ramal H.

Tabla n°1. Evaluación del error entre DTM

Dique						Ramal						Bo. Jardín					
Modelos	SRTM ORIGINAL	SRTM MODIFICADO	PIXAD	ODM	GPS	Modelos	SRTM ORIGINAL	SRTM MODIFICADO	PIXAD	ODM	GPS	Modelos	SRTM ORIGINAL	SRTM MODIFICADO	PIXAD	ODM	GPS
SRTM ORIGINAL		2.51	8.71	101.04	10.88	SRTM ORIGINAL		7.89	33.69	33.10	16.20	SRTM ORIGINAL		3.74	29.41	24.94	18.53
SRTM MODIFICADO			10.16	101.49	12.03	SRTM MODIFICADO			42.98	41.83	24.93	SRTM MODIFICADO			34.15	29.87	23.27
PIXAD				91.33	2.98	PIXAD				29.94	18.40	PIXAD				3.47	9.88
ODM					89.10	ODM					15.52	ODM					5.41
GPS						GPS						GPS					
Puntos																	
Dique	55																
Ramal	106																
Bo. Jardín	28																
Dique						Ramal						Bo. Jardín					
Modelos	SRTM ORIGINAL	SRTM MODIFICADO	PIXAD	ODM	GPS	Modelos	SRTM ORIGINAL	SRTM MODIFICADO	PIXAD	ODM	GPS	Modelos	SRTM ORIGINAL	SRTM MODIFICADO	PIXAD	ODM	GPS
SRTM ORIGINAL		1.10	2.95	10.05	3.30	SRTM ORIGINAL		2.77	5.80	5.76	4.03	SRTM ORIGINAL		1.93	5.42	4.99	4.30
SRTM MODIFICADO			3.19	10.12	3.51	SRTM MODIFICADO			5.51	6.47	4.99	SRTM MODIFICADO			5.84	5.45	4.81
PIXAD				9.96	3.61	PIXAD				6.26	4.98	PIXAD				3.96	3.14
ODM					6.44	ODM					3.98	ODM					2.33
GPS						GPS						GPS					

Fuente: elaboración personal en base a Pell et al. (2022)



Del análisis de los resultados podemos deducir que el RMSE tiene variaciones en cada modelo. La comparación de pares en el caso del Dique del Fuerte demuestra que el mayor error deriva del procesamiento en ODM (9,44 m), mientras que el error es menor en el software PIX4D (1,61 m). Los SRTM original y modificado poseen valores entre 3,30 m y 3,51 m. Es necesario destacar que el SRTM modificado posee un aumento de los valores en la variable altitud por la integración de las manzanas dentro del modelo. En el segundo caso de pares del ramal H, el procesamiento con ODM posee un error menor (3,99 m.) que el procesamiento del Dique del Fuerte. Quizás ello se debe por la interferencia del agua en la ejecución del vuelo y su alteración en el resultado final. El modelo ejecutado en PIX4D posee un error de 4,06 m, similar a los casos de los DTM SRTM original y modificado (4,03 m y 4,99 m). Finalmente para el tercer par correspondiente al barrio Jardín el procesamiento con ODM resulta tener el menor error (2,33 m), luego se ubica el PIX4D (3,14 m) y en última instancia el SRTM original y modificado (4,30 m y 4,82 m).

Esta interpretación puede contrastarse con el trabajo de Guevara Ochoa et al., (2019) quienes evaluaron los errores para distintas fuentes de datos de modelos digitales de elevación en áreas de llanura. Los productos analizados fueron los satélites ASTER, SRTM y ALOS - PALSAR. A partir del análisis de varios atributos topográficos (altura, área superficial, pendiente del terreno, delimitación de unidades geomorfológicas, estructuras civiles, límites de cuencas y red de arroyos) y la combinación de distintos métodos de interpolación espacial, los resultados arrojaron que tanto el SRTM como el ALOS - PALSAR - DEM poseen un error cuadrático medio (RMSE) de $\pm 4,4$ m a diferencia del ASTER - DEM que demostró un RMSE de ± 9 m; por lo que en áreas baja pendiente es el más representativo de la realidad. En este sentido podría afirmarse que los resultados derivados del análisis de Pell et al., (2022) se ajustan para la evaluación del error del SRTM ALOS PALSAR.

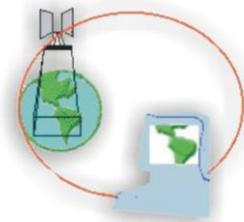
Para concluir los SIG juegan un papel fundamental, no sólo en la integración de la información, sino en la capacidad que tienen para extraer automáticamente los parámetros necesarios para la modelación hidrológica, a través de operaciones espaciales usadas en algoritmos desarrollados para tal fin. “Los algoritmos permiten extraer información hidrológica del DEM, enlazar esta información a modelos o paquetes de modelos hidrológicos y realizar el postproceso, es decir recuperar las salidas de los modelos y graficarlas en el mismo ambiente SIG” (Pusineri et al., 2005. p. 2).



Los modelos, en general, necesitan información fisiográfica, tal como la configuración de la red de drenaje de la cuenca, delimitación y subdivisión de la misma en subcuencas, longitudes y pendientes de tramos de canal, superficies, longitudes y pendientes de subcuencas; así como información de tipo y cobertura del suelo. Estos parámetros eran obtenidos tradicionalmente a través de mapas analógicos o de mediciones de campo y hace aproximadamente dos décadas, esta información ha comenzado a extraerse del aporte de los DEM e imágenes de satélite, aunque como vimos en el desarrollo de este apartado, las mediciones de campo resulten centrales y muy interesantes para una calibración y validación del modelo.

Cada una de las etapas y procedimientos expuestos anteriormente tiene sus propias limitaciones. Algunas derivan, como hemos visto, del instrumental necesario para su desarrollo. No solo la tecnología de precisión, como la disponibilidad de los drones, sino también el instrumental adecuado para llevar a cabo las validaciones de resultados, como GPS diferencial y ajuste con GCP. Otras surgen de las capacidades técnicas de los equipos para su procesamiento y postprocesamiento. Ello refiere a la disponibilidad de memoria RAM, espacio en disco y placa de video. Por último, el tiempo de ejecución de los procesos llevados a cabo por cada software constituye otra limitante, siendo que el ajuste en la configuración y parametrización de los indicadores y opciones de salida demanda un tiempo de cómputo prudente.

En suma las variables morfológicas del terreno y cada uno de estos productos derivados de manera implícita de un DEM definen la construcción de modelos numéricos de simulación para determinar zonas de peligro y elaborar una cartografía de riesgo para la mitigación de inundaciones en cuencas urbanas. La simulación de procesos permite experimentar independientemente del sistema real y alcanzar también una independencia temporal, por lo que se puede retardar, acelerar y repetir el número de modelizaciones en forma arbitraria obteniendo diferentes tipos de escenarios o predecir resultados esperables como se podrá profundizar en el capítulo III.

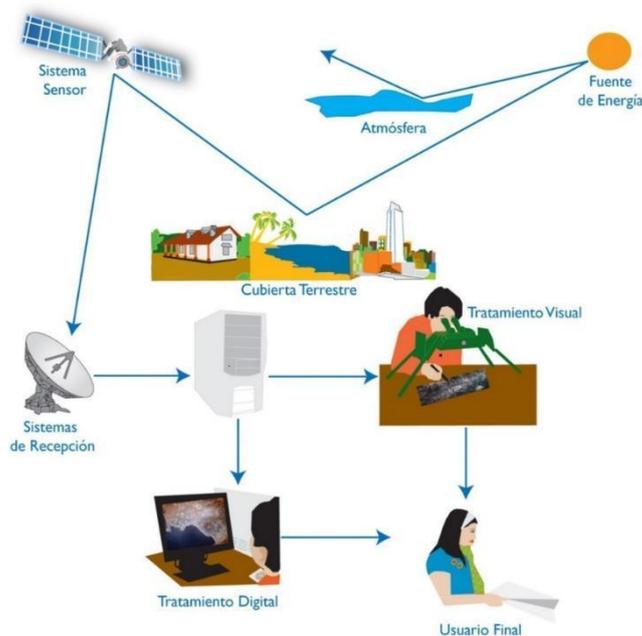


2.2.2 Extracción y análisis de densidades urbanas mediante el procesamiento de imágenes satelitales 1996-2011

La teledetección como campo de aplicación surge con el objetivo de observar la superficie terrestre mediante técnicas de *remote sensing*, definición adoptada a principios de 1960. Pero estas técnicas no engloban sólo los procesos de obtención de una imagen, como muestra en la figura n°18, sino también su posterior tratamiento e interpretación.

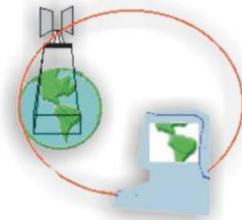
Emilio Chuvieco (2008) señala que las fronteras entre la teledetección aérea y espacial se han ido desvaneciendo, por un lado, porque la primera emplea cada vez más sensores digitales y, por otro, porque la segunda ofrece niveles de detalle más sofisticados mediante sensores montados en las plataformas espaciales.

Figura n°18. Componentes de un sistema de teledetección



Fuente: Chuvieco. (2008)

Haciendo un recorrido de su desarrollo podemos afirmar que los campos de aplicación han sido muy variados que han dependido de los avances tecnológicos a lo



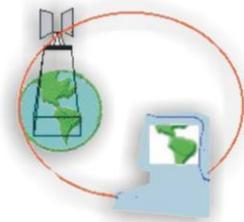
largo de las décadas. En un inicio hacia mediados de 1800 se caracterizó desde la toma de fotografías aéreas en globo para luego, años más tarde, a imágenes tomadas desde aviones gracias a los progresos dados en la óptica y emulsiones.

“Los conflictos bélicos derivaron en un desarrollo importante de las técnicas de la teledetección aérea introduciendo nuevos sensores como el radar y mejorando los sistemas de comunicación. Asimismo el campo de la aeronáutica tuvo grandes avances logrando una mayor estabilidad a las plataformas de observación espacial. De esta manera se amplió el abanico de aplicaciones destacándose los usos civiles y el área de exploración y control de los recursos naturales” (Chuvieco, 2008; p. 21).

Durante los años de posguerra se perfeccionaron los sistemas de radar y los sensores térmicos. A finales de los cincuenta se lanza el primer satélite artificial de observación meteorológica y así se inician distintas tomas de series de imágenes mediante diferentes misiones civiles y militares.

El proyecto Landsat iniciado en la década de 1970 introdujo nuevos campos de aplicación hacia temáticas diversas como el análisis de inundaciones, detección y evolución de focos de incendios, erupciones volcánicas e inventarios agrícolas. En las últimas décadas la gran demanda en cuanto a la cantidad y calidad de la información geoespacial han posibilitado la asociación entre agencias espaciales y la reducción de costos en el diseño de sensores y vehículos de lanzamiento. El crecimiento de los satélites comerciales lanzados por parte de las compañías privadas ha experimentado grandes avances, como así también, el desarrollo de nuevos sensores con mejores tipos de resolución tanto espacial como espectral. En este terreno, “las corporaciones privadas han realizado notables inversiones para mantener sistemas operativos de teledetección espacial que reemplacen de alguna manera las carencias de la observación aérea, facilitando un sistema de observación global en condiciones estándar como por ejemplo Google Earth” (Chuvieco, 2008; p. 25).

Por último el desarrollo de nuevas tecnologías como los equipos LIDAR o la interferometría radar incorporados sobre plataformas aéreas y espaciales más el gran auge de los drones abren un abanico de posibilidades y campos de aplicación en el uso de la teledetección. En los siguientes apartados se hace énfasis en cómo el aporte de los recursos derivados de la teledetección constituyen herramientas de gran aplicabilidad e importancia para el análisis temporal y espacial de la hidrología superficial y la gestión de inundaciones.



Las potencialidades del procesamiento de imágenes satelitales para estudiar procesos urbanos ha sido muy importante y aún continúa siendo un campo experimental de gran desarrollo, no solo por la calidad de los sensores utilizados en las plataformas espaciales sino también por la importancia de la detección de cambios a partir de las mejoras en los tipos de resolución de las series temporales obtenidas de las imágenes de satélite mediante estudios multitemporales.

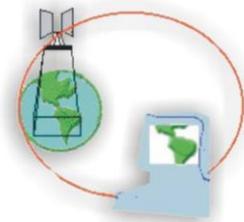
Otra de las dimensiones que integra el modelo datos para el análisis de áreas inundables y anegadas es la evolución de la superficie edificada o construida en el área urbana y complementaria.

Investigaciones llevadas adelante por Linares y Tisnes (2011); Picone y Linares, (2014) y Linares y Picone (2018) han constituido grandes aportes para elaborar una metodología que permita extraer la superficie edificada del área urbana y discrimine las distintas densidades que en ella existen. Cada una de las publicaciones tiene su riqueza técnica y procedimental en el procesamiento de imágenes satelitales; desde la selección de las escenas para los períodos de análisis, el sensor utilizado, la calibración y corrección radiométrica, el criterio elegido para determinar cada clasificador, la utilización de firmas espectrales teóricas, su edición y reajuste espectral, el análisis de los resultados obtenidos post clasificación mediante las firmas de cada clase y la predicción de escenarios futuros de crecimiento urbano mediante modelos de autómatas celulares.

La extracción de superficies con distintas densidades y sus tipologías constructivas mediante un análisis de mezclas espectrales es central para establecer patrones en la detección de áreas anegadas y poder explicar su comportamiento dentro de la modelización asociados a los procesos de expansión, la cobertura de usos de suelo y a la morfología urbana para analizar los códigos de zonificación en materia de planificación y gestión territorial.

Para la variable evolución de superficie construida se utilizó la metodología abordada por Linares y Picone (2018) mediante el procesamiento de imágenes Landsat 5 TM de 30 m de resolución espacial correspondientes a la escena Path 225 y Row 86¹⁶ con fecha 30 de octubre de 1996 y 24 de octubre de 2011.

¹⁶ Imágenes obtenidas de la página web del U. S. Geological Survey <http://glovis.usgs.gov/>

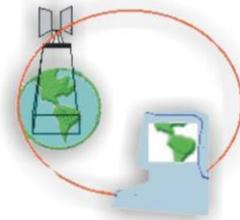


El libre acceso a los productos y la disponibilidad de firmas espectrales con vasta cobertura territorial y temporal garantizaron amplias posibilidades de generalización para conocer la magnitud y forma de la expansión urbana en diferentes momentos y, a su vez, pueda ser replicable a otras escalas en forma periódica.

El trabajo se centró primeramente en el pre-procesamiento de las imágenes a partir de su corrección radiométrica, calibración y la elaboración de una serie de firmas espectrales de áreas urbanas construidas que partieron del antecedente en Linares y Tisnés (2011).

Sobre la base de la información contenida en las bandas espectrales 1, 2, 3, 4, 5 y 7 que corresponden al espectro visible, infrarrojo cercano y medio se aplicó inicialmente un método de clasificación no supervisada mediante la herramienta Iso Cluster del SIG ArcGis obteniéndose 26 conglomerados (clusters) conformados por píxeles con comportamiento espectral homogéneo. A partir de ello fue posible extraer las clases temáticas de interés sobre las cuales se lograron las firmas espectrales correspondientes. De esta clasificación se seleccionaron los píxeles de las clases que se encontraban claramente superpuestos sobre usos del suelo urbano y áreas construidas (Picone y Linares, 2014).

En una siguiente etapa se editaron y optimizaron las firmas individuales de las clases obtenidas, de tal modo que sirvan como parámetros para reclasificar la imagen multiespectral de origen realizando una clasificación supervisada. En esta clasificación se realizan generalmente tres etapas: 1) etapa de entrenamiento; 2) selección del algoritmo de clasificación adecuado y clasificación y 3) operaciones de post-clasificación (Picone y Linares; 2014). De esta manera, se seleccionaron la totalidad de los píxeles de cada una de las clases urbanas construidas de manera individual y se extrajeron muestras de reflectancia para cada una de las bandas de la imagen Landsat 5 TM. Como resultado se obtuvieron valores medios (media) y umbrales (máximos y mínimos) de reflectancia para cada clase en cada una de sus bandas para llevar a cabo la clasificación supervisada y comparar los resultados. Con el objetivo de lograr una clasificación óptima se interpretaron las clases urbanas mediante el análisis lineal de mezclas espectrales. Para ello se recurrió a series provistas por bibliotecas espectrales pensando que la señal que registra el sensor en cada píxel, representa una mezcla de reflectancias de varias coberturas puras. A partir de la identificación de las coberturas puras en cada una de las clases y su representación proporcional por unidad de



superficie, se llevó adelante un reajuste espectral en cada una de ellas como se muestra en la figura n°19 que permitió mejorar la clasificación e interpretación de usos del suelo urbano en los diferentes períodos considerados.

Figura n°19. Reajuste de las firmas espectrales para cada clase según bandas del satélite Landsat 5 TM

Classes	Spectral Signature (Minimum and Maximum for Each Band and Class)	Characteristics	Sample Image
Low density	B1: 0.100789–0.144165 B2: 0.100883–0.158503 B3: 0.090548–0.157492 B4: 0.283694–0.403982 B5: 0.199319–0.265179 B7: 0.135501–0.193289	30% to 45% of constructed area (20% cement, 15% asphalt, 5% red roofing tile, 5% cement badge) and the rest is green area (35% grass and 20% trees).	
Middle density (A)	B1: 0.096573–0.141425 B2: 0.097905–0.150625 B3: 0.100774–0.158934 B4: 0.152680–0.261476 B5: 0.155724–0.232228 B7: 0.091262–0.188210	55% to 85% of constructed area (62% asphalt, 7% concrete roads, 4% cement and 5% road of loose materials) and the rest is green area (grass).	
Middle density (B)	B1: 0.107656–0.152816 B2: 0.124758–0.174898 B3: 0.131844–0.190040 B4: 0.185933–0.300921 B5: 0.181205–0.282537 B7: 0.143892–0.227124	55% to 85% of constructed area (60% cement badge and 25% cement) and the rest is green area (grass).	
Middle density (C)	B1: 0.090806–0.139462 B2: 0.110516–0.178774 B3: 0.125206–0.219218 B4: 0.221674–0.252586 B5: 0.227136–0.369960 B7: 0.196043–0.349435	55% to 85% of constructed area (45% asphalt, 20% red roofing tile, 20% cement) and the rest is green area (tress).	
High density	B1: 0.140074–0.227186 B2: 0.139103–0.260147 B3: 0.151912–0.270692 B4: 0.144505–0.337661 B5: 0.178452–0.376528 B7: 0.150452–0.425840	85% to 100% of constructed area (40% cement, 50% cement badge, 6% red roofing tile and 4% asphalt)	



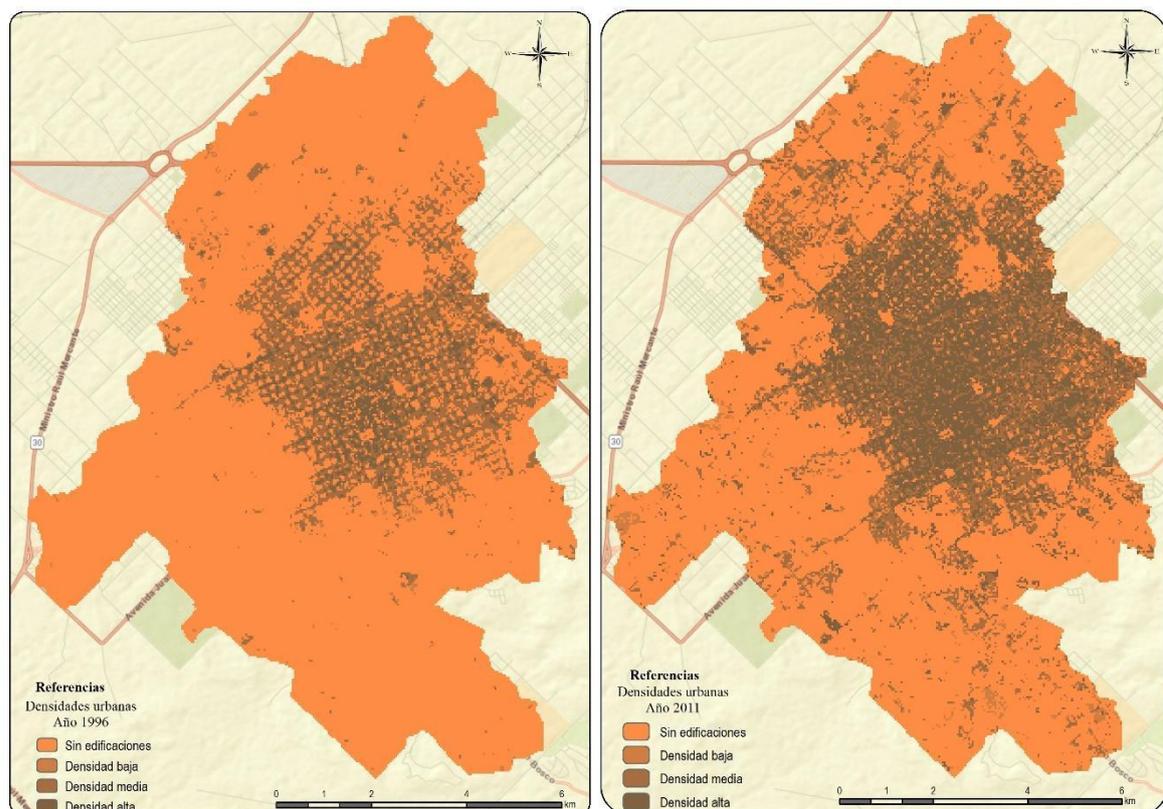
Fuente: Linares y Picone. (2018)¹⁷

Definidas las clases que representan las distintas densidades de edificación en el área urbana y conociendo el error aproximado de la clasificación se calculó la superficie edificada para el período considerado (1996-2011).

El mapa n°17 discrimina las densidades de superficie construida dentro de la cuenca urbana del Arroyo Languyú de la ciudad de Tandil. Las cuatro tipologías de coberturas según densidad de superficie edificada se dividen en: (1) Sin edificaciones, (2) Densidad de edificación baja (3) Densidad de edificación media y (4) Densidad de edificación alta.

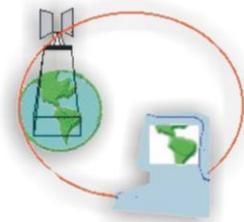
Mapa n°17. Densidades urbanas en la cuenca urbana de la ciudad de Tandil.

Año 1996 y 2011



Fuente: elaboración personal en base a Linares y Picone. (2018)

¹⁷ La clase de “Densidad de edificación media” consta de tres firmas de mezcla espectrales, cada una de las cuales representan una cobertura particular con la misma cantidad de construcción.



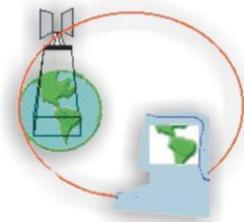
Si establecemos una asociación entre la variable anterior, el aumento de la superficie edificada y el desarrollo de un evento hidrometeorológico, en términos generales, se podría inducir que las superficies de infiltración, sólo analizando la categoría 1 en la clasificación, en 1996 integraban un total de 53.863 píxeles y en 2011 solo 41.879 píxeles. Es decir, se observa una significativa disminución de $53.863 - 41.879 = 11.984$ píxeles. Si cada píxel posee una resolución espacial de 30 m, entonces su superficie equivale a 900 m^2 , deduciendo que la cantidad de hectáreas de infiltración perdida es igual a $11.984 \times 900 = 10.785.600 \text{ m}^2 = 1078,56 \text{ ha}$. La tabla n°2 compara los cálculos para el resto de las clases. Se observa una reducción en la cantidad de píxeles en los períodos considerados para la clase 1 y el incremento de la clase 2 (densidad baja) a la 3 (densidad media) que claramente coincide con el desarrollo urbano hacia los ejes de expansión. Si contemplamos la categoría de densidad alta en ambos momentos claramente se evidencia un aumento de la superficie edificada en barrios en proceso de consolidación con parcelas vacantes o baldías y vincula la verticalización en altura en el área central. Ahora bien, si analizamos el comportamiento al interior de las clases de cada período revela una compactación del área residencial.

Tabla n°2. Cálculo de superficies por m^2 y ha según categoría de densidades urbanas

Densidades 1996	Categorías	Conteo píxeles	m^2	ha
Clase 1	Sin edificaciones	53.863	48.476.700	4847,67
Clase 2	Densidad baja	812	730.800	73,08
Clase 3	Densidad media	9311	8.379.900	837,99
Clase 4	Densidad alta	2933	2.639.700	263,97

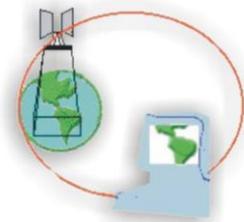
Densidades 2011	Categorías	Conteo píxeles	m^2	ha
Clase 1	Sin edificaciones	41.879	37.691.100	3769,11
Clase 2	Densidad baja	2254	2.028.600	202,86
Clase 3	Densidad media	11.406	10.265.400	1026,54
Clase 4	Densidad alta	11.380	10.242.000	1024,2

Fuente: elaboración personal



Estos cálculos permiten explicar algunos patrones de distribución espacial de la población como la configuración espacial en áreas de expansión, el aumento de la superficie pavimentada y/o construida, la densidad de habitantes y las características de cada zona de crecimiento y consolidación según las políticas de planificación y la dinámica del mercado inmobiliario. Respecto al drenaje urbano estos patrones implican el aumento de áreas impermeables y una disminución de la infiltración. Las modificaciones en la normativa de usos de suelo y zonificación también impactan en este análisis según la superficie mínima de loteo, el tipo de uso y los equipamientos que alteran el proceso de escorrentía aguas arriba y abajo de la cuenca urbana.

De todos modos es necesario tener en cuenta dos cuestiones metodológicas de este procedimiento que pueden ajustarse para lograr una mayor optimización en los resultados obtenidos. Por un lado, el uso de las fuentes suministradas por la Municipalidad de Tandil es deficiente y se encuentra desactualizada ya que no se discrimina la superficie edificada cubierta de la no cubierta en las bases de datos de sus dependencias municipales. Este subregistro afecta la fidelidad del dato sobre la cual se evalúa la clasificación y, por otro, se debe considerar las diferencias entre las unidades espaciales para validar la información. Las manzanas provenientes del catastro urbano de Tandil poseen una superficie de 16.900 m² o 1,6 ha sin considerar el parcelamiento del área complementaria, mientras que los píxeles de las imágenes empleadas son de 900 m² (30 x 30 m). Más allá de realizar una agregación espacial de los píxeles para llevarlos a unidades comparables implica una alteración de los datos originales generando errores en el método de validación final. Estas consideraciones implican un mayor esfuerzo que podría resolverse ajustando la fuente de datos primaria y complementando el uso de nuevas imágenes de mayor resolución espacial e inclusive proveniente de otros sensores.



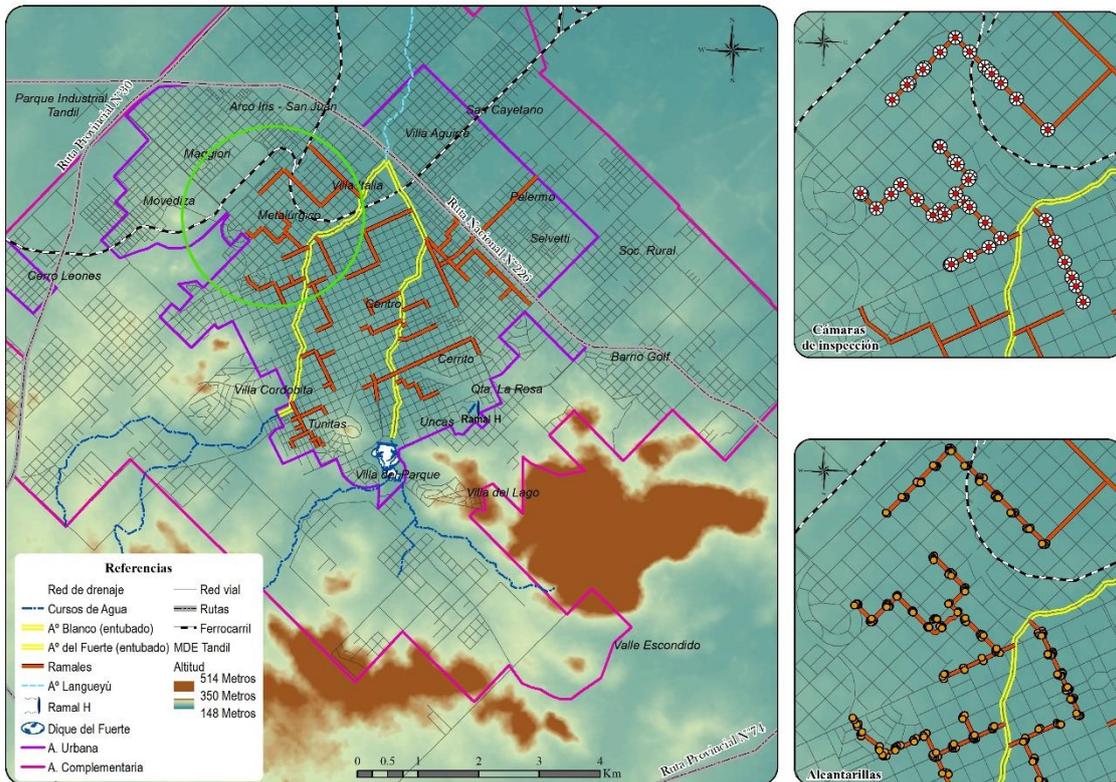
2.2.3 Edición vectorial de la red de infraestructura pluvial y su función en la red de drenaje

Otra de las variables del modelo de datos para detectar áreas anegadas e inundables y analizar la red de drenaje está definida por el funcionamiento de la red de infraestructura pluvial. La discriminación entre vectores lineales que integran conductos principales, ramales y los cursos de agua que escurren en forma abierta y los puntos como nodos que definen las alcantarillas y cámaras de inspección, constituyen indicadores de cómo se comporta la red frente a un evento hidrometeorológico. Es decir si la red es funcional al crecimiento y expansión espontánea de la ciudad tanto en el área urbana como complementaria. Estos indicadores revelan la situación en las zonas de riesgo ante la falta de obras de mantenimiento, la actualización de ramales y nuevos sumideros en las zonas de expansión.

Actualmente se detectan anegamientos en el radio urbano del centro de la ciudad por la insuficiencia del sistema debido a la alta densificación e impermeabilidad, anegamientos en barrios que no cuentan aún con las obras previstas frente al ritmo de crecimiento y anegamientos por asentamientos precarios ubicados en zonas bajas de la periferia.

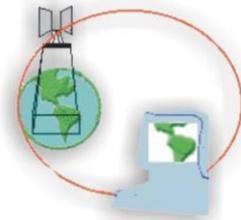
El mapa n°18 hace referencia a la digitalización de la red de infraestructura obtenida a partir de los planos y memorias descriptivas disponibles en la Dirección de Hidráulica de la provincia de Buenos Aires en formato analógico. Se trazaron los conductos principales que definen el entubamiento de ambos arroyos, los ramales detectados en las memorias y perfiles y la distribución espacial de las alcantarillas y cámaras de inspección digitalizadas solo en algunos sectores de la red, de manera que puedan ser utilizadas para realizar escenarios y/o predicciones. Las tareas de edición se hicieron en base a la planimetría disponible y no se encuentra actualizada teniendo en cuenta que la población se ha ido asentando hacia las líneas de desarrollo urbano. El último plano que se exploró fue el que forma parte de la avenida Actis y su conexión hacia el barrio Palermo. Pero no se tuvo detalles de la extensión de la red en varias áreas de expansión como en dicha zona, el NE y SE que indican una mayor presencia de inversiones especulativas, comerciales y emprendimientos turísticos y las que derivan del crecimiento espontáneo a partir del desarrollo urbanístico de viviendas hacia el N y NO.

Mapa n°18. Red de infraestructura pluvial



Fuente: elaboración personal en base a los planos de la Dirección de Hidráulica de la provincia de Buenos Aires

En algunas áreas se realizaron recorridos para corroborar la localización de sumideros mediante el relevamiento con GPS y poder ajustar topológicamente cada entidad dentro de la red, por lo menos, para garantizar la consistencia de los datos dentro del modelo. Si bien el detalle de las cámaras de inspección no resulta imprescindible para determinar el proceso de escorrentía, es interesante observar su saturación, ya que es un parámetro que influye en el nivel de peligro de anegamiento. Cuando colapsa el sistema de drenaje en los conductos y alcantarillas impacta sobre las cámaras de inspección que se utilizan para tareas de mantenimiento y limpieza y en general los accesos principales y eje de calles se transforman en vías de escurrimiento y drenaje superficial.



Para las modelizaciones de los escenarios de los dos momentos analizados no se incorporó esta entidad debido a la necesidad de su precisión y calibración en base a los vuelos realizados en el apartado 2.2.1. Los resultados de las simulaciones solo contemplaron si existe o no infraestructura y su importancia en la red de drenaje de cada subcuenca.

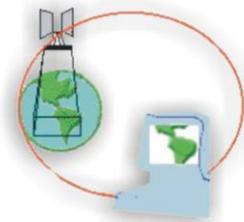
En la tabla n°3 se pueden apreciar algunos atributos que se cargaron para definir las entidades de la red como nombre, superficie del conducto o ramal, largo y ancho, nomenclatura catastral, calles y otros campos que resultaron de la obtención de información a partir de productos derivados como la topografía, pendiente, altitud y la dirección de escurrimiento. Cada uno de estos campos tiene sentido para los análisis de un modelo unidimensional (1D) teniendo en cuenta la configuración de la red geométrica como observaremos más adelante.

Tabla n°3. Atributos de la red de infraestructura pluvial

Nombre	Altitud	Calles	Hom. Catast	Conducto/Ramal	Dir. Flujo	Denominaci	Pendiente	MediBe	SupCond	ZonaRest	TotMedRa	Ancho	Shape
Blanco	183	Figueroa ent Muratore y	IE139r		NE	Conducto	0,894699	9	15	0	3 mts y	52,21898	
Blanco	183	Av. Del Valle	IC71a		NE	Conducto	0,894699	9	15	0	3 mts y	8,94527	
Blanco	186	Yrigoyen y Machado	IC71a		NE	Conducto	1,013406	9	15	0	3 mts y	156,0815	
Blanco	184	Chacabuco y Arana	IC71d		NE	Conducto	1,262965	9	15	0	3 mts y	197,1939	
Blanco	189	14 de Julio y Uruburu	IC63a		NE	Conducto	2,069492	9	15	0	3 mts y	164,5802	
Blanco	184	14 de Julio ent Uruburu y	IC83b		NE	Conducto	1,235002	9	15	0	3 mts y	144,4005	
Blanco	187	14 de Julio y Pellegrini	IC84a		NE	Conducto	1,235002	7	13	0	3 mts y	60,92236	
Blanco	187	14 de Julio ent Pellegrini	IC84c-IC84c2		NE	Conducto	1,438279	7	13	0	3 mts y	128,2835	
Blanco	188	San Lorenzo ent Montev	IC84d		NE	Conducto	1,602085	7	13	0	3 mts y	95,1674	
Blanco	186	San Lorenzo y Las Hera	IC95b		NE	Conducto	1,106019	7	13	0	3 mts y	92,70015	
Blanco	186	Alberdi ent Las Heras y	IC96a		NE	Conducto	1,049994	7	13	0	3 mts y	114,1923	
Blanco	189	Alberdi ent Las Heras y	IC96b		NE	Conducto	1,907314	7	13	0	3 mts y	89,84848	
Blanco	193	Av. Peron ent Garibaldi	IC97b		NE	Conducto	1,329197	7	13	0	3 mts y	102,5266	
Blanco	190	Av Peron y Av España	IC104a		NE	Conducto	1,373871	7	13	0	3 mts y	94,06710	
Blanco	191	Av. Rivadavia ent Av Mo	IC105a		NE	Conducto	1,013406	7	13	0	3 mts y	151,4317	
Blanco	192	Av. Rivadavia ent S.M d	IC105b		NE	Conducto	1,999957	7	13	0	3 mts y	75,12035	
Blanco	196	Brandtsen ent Paraguay	IC106a		NE	Conducto	3,649324	7	13	0	3 mts y	204,5357	
Blanco	191	Av. Rivadavia ent Pje. G	IC105c		NE	Conducto	1,210307	7	13	0	3 mts y	70,73054	
Blanco	183	Av. Del Valle	IC71a		NE	Conducto	0,894699	9	15	0	3 mts y	3,42278	
Del Fuerte	186	Sandino	IB56 trlo 67		SO-NE	Conducto	0,122906	9	15	0	3 mts y	150,2357	
Del Fuerte	187	Sandino y Gardel	IB67		SO-NE	Conducto	0,959839	4	10	0	3 mts y	94,68369	
Del Fuerte	187	Sandino y Serrano	IB68a		SO-NE	Conducto	1,05716	4	10	0	3 mts y	150,4134	
Del Fuerte	189	Ricchieri ent Serrano y F	IB68b		SO-NE	Conducto	0,990804	4	10	0	3 mts y	122,0607	
Del Fuerte	188	Ricchieri y Fugl	IB68d		SO-NE	Conducto	2,214622	4	10	0	3 mts y	71,63476	
Del Fuerte	191	Ricchieri ent Fugl y Lobe	IB69aa y IB69ab		SO-NE	Conducto	2,800463	4	10	0	3 mts y	174,9902	
Del Fuerte	196	Larrea	Dique	Rect 455x	SO-NE	Conducto	0	4	10	0	3 mts y	121,4547	
Del Fuerte	187	Paz ent Constitucion y A	IA18		SO-NE	Conducto	0,869012	6	15	0	3 mts y	147,0866	
Del Fuerte	190	Sandino y Alem	IB67c		SO-NE	Conducto	0,173815	4	10	0	3 mts y	62,44303	
Del Fuerte	191	Rebol ent Loberia y Larr	IB69bb		SO-NE	Conducto	1,210307	4	10	0	3 mts y	157,2890	
Del Fuerte	187	Sandino	IB56 trlo 67		SO-NE	Conducto	0,869012	9	15	0	3 mts y	10,1071	

Fuente: elaboración personal

En estos modelos es fundamental el desarrollo de una escala precisa validada por los DTM obtenidos de los vuelos para que durante las simulaciones del modelo no arrojen problemas de integridad por falta de parámetros hidráulicos, topología o consistencia debido a la información disponible.



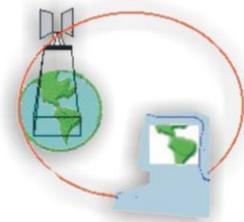
2.2.4 Registros pluviométricos para la modelización de eventos hidrometeorológicos

La última variable del modelo de datos que forma parte de la obtención de escenarios de simulación y el desarrollo de eventos para predecir zonas inundables y anegadas en el área urbana y complementaria está conformada por la confección de los hietogramas según intensidad, duración y frecuencia del registro de lluvias detectado y los caudales basados en datos de precipitación acumulada según intervalos de tiempo.

Por lo general los estudios sobre precipitaciones intensas en Bertoni y Tucci (1993), Devoto (2002) y Bertoni (2004) se orientan alternativamente a la estimación de: (I) curvas intensidad- duración-frecuencia (I-D-F) o (II) de tormentas máximas probables (PMP). Para estudios ligados a cuencas urbanas, obras viales y obras hidráulicas menores la característica habitual es el empleo de curvas I-D-F. El enfoque de PMP se asocia a proyectos de ingeniería de grandes obras, donde el riesgo de falla debe ser minimizado.

Como es conocido, la falta de toma de datos hidrometeorológicos, la falencia de los datos de tipo lluvia-caudal y, más aún, de su adecuado tratamiento posterior, es una constante en Argentina. El resultado de este panorama es que un importante número de centros urbanos argentinos no disponen de curvas I-D-F. Pese a que Argentina se caracteriza por presentar una gran variabilidad espacial en sus precipitaciones anuales, los fenómenos atmosféricos extremos de corta duración que dan origen a las precipitaciones intensas presentan mayor homogeneidad territorial. Por lo tanto, una solución ante la falta de curvas I-D-F es el empleo de métodos de regionalización hidrológica. Lamentablemente, el nivel alcanzado hasta la actualidad por este tipo de estudios en el país no es totalmente satisfactorio. En estos métodos la tendencia general es al aumento de la incertidumbre de sus estimaciones a medida que disminuye la disponibilidad de datos de la región de interés.

Recurriendo a investigaciones sobre los cambios en la precipitación promedio anual en la Región Pampeana (Pérez et al., 2015), el análisis de su distribución y variabilidad (Aliaga et al., 2016), el estudio de datos grillados para el análisis espaciotemporal de las precipitaciones en la provincia de Buenos Aires (Casado y Picone, 2018) y casos de estudio como las tendencias del régimen de precipitación y el

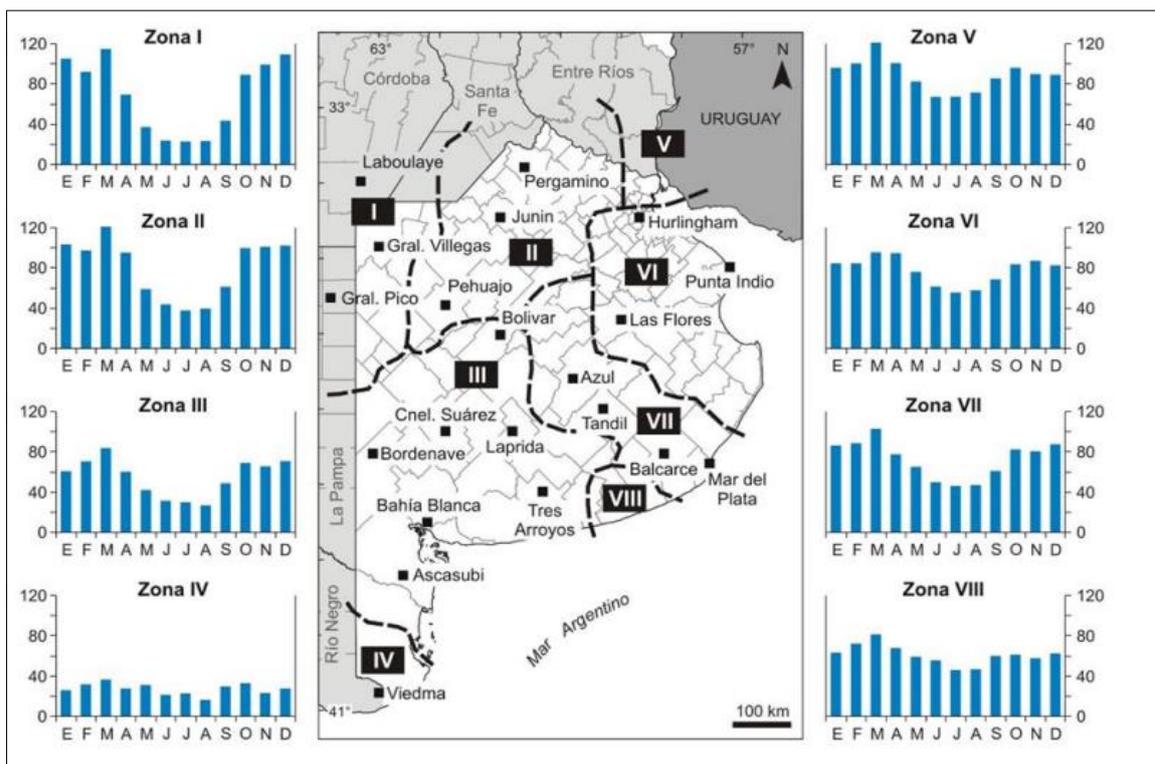


manejo sustentable de agroecosistemas en el NO de Buenos Aires (Sierra, 2006) y el clima urbano de la ciudad de Tandil (Picone, 2014) se puede afirmar que el comportamiento de los regímenes pluviométricos en la región se basan en el fenómeno ENSO y la alternancia de ciclos secos y húmedos a lo largo del tiempo.

Eduardo Fenoglio (2019) señala que la variabilidad climática consiste en la secuencia de las oscilaciones en los valores de las variables climatológicas (temperatura, precipitación, etc.) que fluctúan por encima o por debajo de lo normal. “Podemos discriminar fluctuaciones temporales estacionales, intraestacionales, interanuales e interdecadales. Según el autor las principales ciudades de Argentina (Buenos Aires, Rosario, Córdoba) se encuentran en la zona húmeda, que es una de las regiones del mundo con mayores aumentos de precipitación anual observados entre 1901 y 2010. Se aprecian valores de tendencia significativos de entre 25 y 50 mm por década, desde comienzos del siglo XX, que se mantuvieron en la misma dirección entre 1951 y 2010” (Fenoglio, 2019; p. 33).

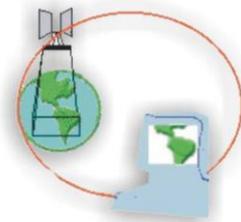
Realizando un análisis de estos antecedentes en el mapa n°19 se observa que las precipitaciones de la provincia de Buenos Aires se concentran en las estaciones de primavera y verano, mientras que los meses invernales registran los menores montos de precipitación mensual. Los regímenes de precipitación decrecen en magnitud hacia el SO; el O de la provincia, zonas I a IV, exhibe inviernos netamente más secos que el E - zonas V a VIII (Casado y Picone, 2018).

Mapa n°19. Distribución anual de la precipitación (mm) y zonas de comportamiento pluviométrico homogéneo en la provincia de Buenos Aires y zonas aledañas. Período 1911-2000

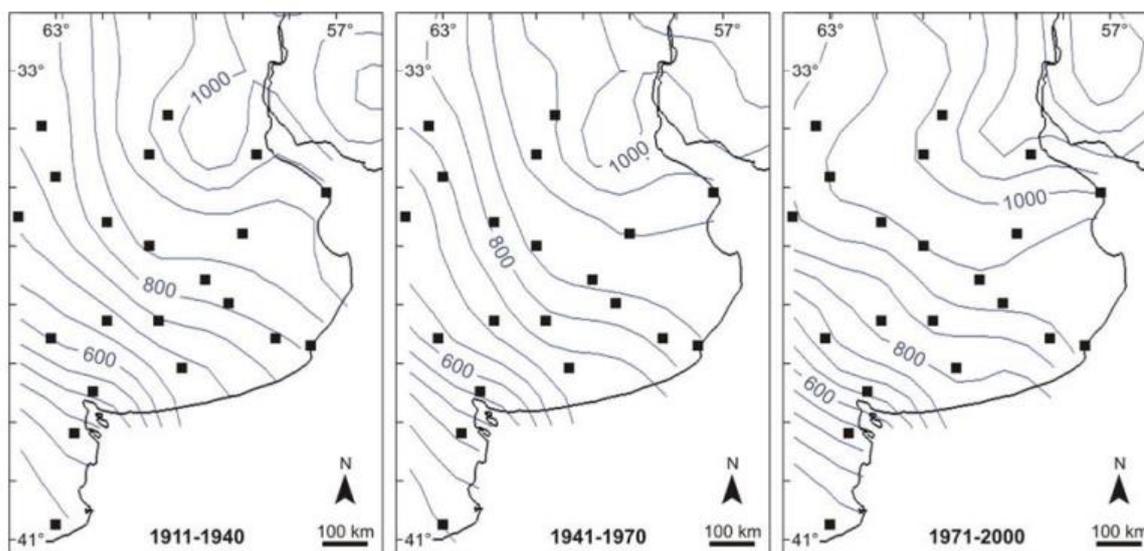


Fuente: Casado y Picone. (2018)

Las series de datos grillados indican que la precipitación media anual (1911-2000) en el área de estudio decrece de 1200 mm en el extremo NE a 300 mm en el extremo SO debido en gran medida de la degradación progresiva de las masas de aire húmedo provenientes del Atlántico por el aumento de las masas de aire seco provenientes del Pacífico. Se observa un marcado corrimiento hacia el SO de las isohietas de 30 años a lo largo del siglo, particularmente pronunciado durante el último período como se observa en el mapa n°20. Este corrimiento responde al incremento generalizado de la precipitación registrado desde los años '60 y ha sido por tanto documentado por numerosos estudios para períodos equivalentes según lo señalan Picone y Casado (2018).



Mapa n°20. Distribución de la precipitación media anual en la provincia de Buenos Aires para tres periodos de 30 años a lo largo del Siglo XX



Fuente: Casado y Picone. (2018) en base a los datos de la Physical Sciences Division (PSD) del Earth System Research Laboratory (ERSL) de NOAA

Guerrero (2019) señala en su investigación que las inundaciones son fenómenos recurrentes y alternan con períodos de sequías a los que se suman cambios de larga duración en los montos medios de las precipitaciones. Es por ello que se evidencia un desplazamiento en el sentido E-O de la isoyeta de 900 mm y, consecuentemente, montos de precipitaciones medias superiores.

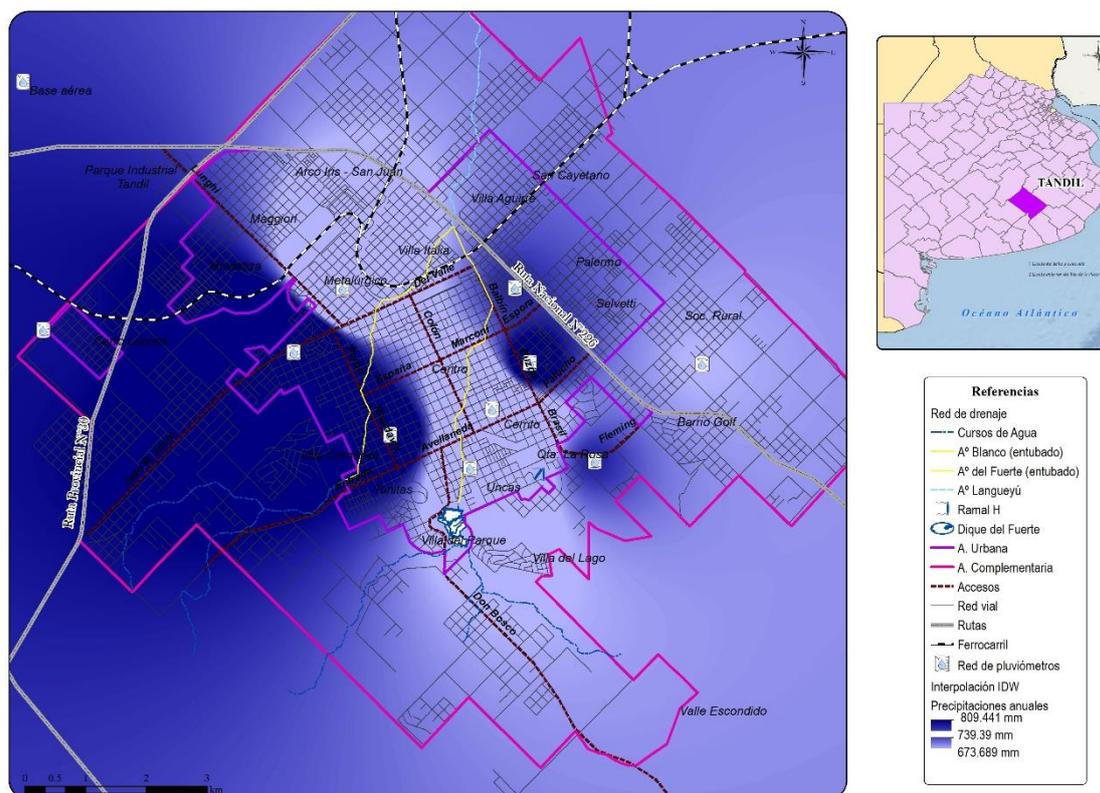
A escala local el partido de Tandil se encuentra sometido a continuas variaciones interanuales de las precipitaciones. Si consideramos el período de análisis en Picone (2014) desde octubre de 2008 a septiembre de 2009 y desde octubre de 2010 a junio de 2013, las lluvias fueron variables. “El promedio de las precipitaciones anuales fue de 855 mm, solo 10 mm más que los valores medios. El año más seco fue 2008 – 2009 con 468 mm y el más lluvioso fue 2011 – 2012 con 1.158 mm. La variación de 690 milímetros es producto de las condiciones atmosféricas en el área durante cada año, principalmente los fenómenos asociados a ENSO” (Picone, 2014, p.89).

Los registros pluviométricos del período 2010 – 2011 reflejan una distribución con características normales respecto al registro de precipitaciones del año posterior, por lo



cual, se generó el mapa n°21 que muestra la interpolación de lluvias a partir de los registros anuales.

Mapa n°21. Mapa de Interpolación (IDW) de lluvias según registros pluviométricos. Período 2010 - 2011. Ciudad de Tandil



Fuente: elaboración personal a partir de bases de datos de Picone. (2014)

Los resultados de la interpolación espacial *Inverse Distance Weighted* (IDW) para analizar la variabilidad de las precipitaciones a partir de valores muestrales reales considerando el peso de la distancia a la red de cada pluviómetro, revela los mayores valores de lluvias sobre cuatro zonas principales: hacia el S, O, centro N y E; los registros más bajos comprenden el centro, NO y SE. Este comportamiento se explica por las diferencias climáticas al interior de la ciudad y cómo influyen las variables topográficas de altitud, la pendiente, el aumento de la superficie edificada, la impermeabilización de espacios, la densidad de ocupación y la presencia o ausencia de



espacios verdes (Picone, 2014) en las funciones hidrológicas e hidrográficas del balance hídrico.

En cuanto a los eventos hidrometeorológicos, tanto el año 2011 – 2012 como el promedio de precipitaciones de invierno, estuvieron influenciados por lluvias extraordinarias. Por lo tanto, se seleccionaron los registros de febrero, noviembre y diciembre del año 2012 para construir hietogramas y simular los primeros escenarios (La Macchia, 2015). Cabe destacar que la información obtenida posee un subregistro, por lo que se debe comparar con distintas fuentes de datos como la del SMN¹⁸ para que los valores sean fidedignos. En esta investigación se combinaron las fuentes de información provista por la red de pluviómetros *NET ATMO*¹⁹ a partir del mapa n°21 con las disponibles en la plataforma *Weather Underground*²⁰. Ambas fuentes registran información del evento cada 5 minutos. Para esta última, la localización de las estaciones ha ido variando; de un total de 5 identificadas hasta febrero del 2022 pasaron a estar en funcionamiento solo 3; una ubicada en Tandil y dos en localidades aledañas. Los registros recogidos fueron interesantes para introducir hietogramas, construir hidrogramas hipotéticos, comparar y complementar los escenarios disminuyendo la brecha ante la falta de instrumental en el área de estudio. Asimismo fue posible poder recurrir a los boletines elaborados por las estaciones de la red de alerta temprana de la localidad de Azul (IHLLA-UNCPBA)²¹ para generar nuevas hipótesis de trabajo analizando valores promedios a escala regional, evaluar caudales y predecir nuevas variables del comportamiento hidrológico.

¹⁸ Servicio Meteorológico Nacional: <https://www.smn.gob.ar/>

¹⁹ Estaciones meteorológicas NET ATMO: <https://www.netatmo.com/es-es/weather/weatherstation>

²⁰ Plataforma de datos de estaciones meteorológicas:
<https://www.wunderground.com/weather/ar/tandil>

²¹ El IHLLA posee una amplia red de monitoreo de datos meteorológicos, aguas superficiales, zona no saturada y acuífero freático en toda la cuenca, algunas de las cuales están enlazadas a la red de alerta de inundaciones de la ciudad de Azul. Esta información se encuentra disponible para los usuarios en la base de datos hidrológicos de Azul desde 2002 a través de un sistema soporte de gestión de la información hidrológica denominado Base de Datos Hidrológicos (BDH, www.azul.bdh.org.ar).



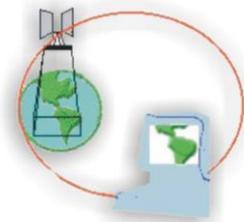
3. Geografía, TIG y modelización para la gestión del riesgo de inundaciones

La caracterización del área de estudio y la presentación de las dimensiones de análisis y variables del esquema de trabajo permiten adentrarnos en el tercer apartado del marco técnico metodológico que refiere a los instrumentos para el tratamiento y análisis de la información geográfica. Por un lado, las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) en el tratamiento, procesamiento y análisis de la información espacial, y la Geografía como disciplina y campo de aplicación para las modelizaciones.

La concepción de la geografía cuantitativa advierte en la actualidad un impacto teórico-metodológico que trasciende los límites disciplinarios apareciendo también campos interdisciplinarios y transdisciplinarios. “Corresponde a una línea de avance que presenta un claro interés por la incorporación de la dimensión espacial en una variedad de estudios a través de técnicas cuantitativas abstractas que llegan al mayor nivel de concreción ante el estudio de la realidad empírica con amplio potencial de generar información estratégica para la toma de decisiones” (Fuenzalida Díaz et al., 2015; p. 31). Muchos de los conceptos y categorías de análisis estudiadas en la tradición paradigmática de la geografía son revalorizados surgiendo nuevas corrientes y asimismo incorporando el aporte de nuevas variables. Una de esas corrientes es la Geografía Automatizada (Geoinformática) que revaloriza los métodos cuantitativos en los estudios de análisis espaciales mediante el uso de equipos computacionales como también el apoyo de las tecnologías de la información y comunicación.

“La Geografía Aplicada vive un importante auge al recibir un apoyo geotecnológico que vincula los más logrados desarrollos en cartografía y percepción remota, junto al tratamiento estadístico del análisis multivariado” (Buzai, 2016; p.17).

Moreno Jiménez (2010) señala que el conocimiento y la información geográfica se encuentra en un nuevo estadio llamado “sociedad de la geoinformación” (SGI). “Ello está siendo propiciado por toda una serie de factores concurrentes: desarrollo de las comunicaciones y de las tecnologías de la computación, nuevas políticas de producción y distribución de geodatos digitales (especialmente en el sector público), aumento de los agentes de producción y difusión de geodatos y cartografía” (Moreno Jiménez, 2010; p.1).



En palabras de Gustavo Buzai y García de León no se espera que la tecnología proponga soluciones a los problemas que se abordan en la Geografía. “En contraste, si deberá facilitar el planteamiento de análisis espaciales bajo el rigor científico ofreciendo resultados precisos y con el suficiente detalle para perfilar posibles soluciones a las problemáticas de toda índole (no únicamente las sociales) que se enfrentan” (Buzai y García de León, 2015. p.46).

En las últimas décadas la importancia de las TIG y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para modelizar la realidad ha trascendido el campo de la geografía utilizando el aporte de multidisciplinas para comprender y analizar los problemas socioespaciales. “Sus funciones haciendo énfasis en la captación, gestión, análisis y representación de la información espacial, conforman una herramienta integradora que permite abordar una gran diversidad de temáticas y problemas, independientemente de los enfoques epistemológicos de referencia” (Linares, 2012, p.107).

En Fuenzalida Díaz et al., (2015) se destaca el lugar ocupado por la Geografía Aplicada centrada en la utilización de conocimientos y habilidades geográficas para la resolución de problemas sociales, económicos y ambientales. Este aspecto se sustenta actualmente en las metodologías y técnicas del análisis espacial que pueden ser llevadas a cabo a través del uso de los SIG al servicio de los procesos de toma de decisiones en materia de planificación y ordenamiento territorial para equilibrar las disparidades socioespaciales de cada lugar hacia el logro de una equidad y justicia espacial (Baxendale, 2015).

Buzai (2011; 2015a, 2015b, 2016 y 2017) señala las perspectivas centrales que definen la evolución del pensamiento geográfico y se encuentran ligadas a la Geografía Aplicada situando el foco en los SIG. Ellas son la ecológica que destaca a la geografía como el estudio de la relación del hombre y su medio (sociedad-naturaleza); la corológica plantea que su objeto de estudio es la región, entendida como la diferenciación de espacios sobre la superficie terrestre. Y la sistémica, que define a la geografía desde un punto de vista sistémico como la ciencia que estudia las leyes que rigen las pautas de distribución espacial. Las actuales tendencias en investigación aplicada, destruyendo diferentes aspectos dicotómicos, hace confluir las tres definiciones con el objetivo de realizar estudios de mayor alcance. Cada una de estas perspectivas implica tener en cuenta en el estudio del espacio geográfico la integración



de cinco conceptos fundamentales de naturaleza espacial para el tratamiento y análisis de la información geográfica:

- *Localización:* Todas las entidades (con sus atributos asociados) tienen una ubicación específica sobre el espacio geográfico. Esta ubicación puede ser vista de dos formas diferentes. Si se apela al denominado espacio absoluto corresponde a un sitio específico y fijo de emplazamiento sustentado por la topografía local y si se apela al denominado espacio relativo corresponde a una posición específica y cambiante respecto de otros sitios con los cuales se pueden establecer vínculos funcionales.
- *Distribución espacial:* El conjunto de entidades de un mismo tipo se reparten de una determinada manera sobre el espacio geográfico. Estas pueden ser puntos, líneas y polígonos (áreas) con sus diferentes atributos asociados.
- *Asociación espacial:* Corresponde al estudio de las semejanzas encontradas al comparar diferentes distribuciones espaciales. La forma de comparación visualmente más clara y directa es la que corresponde a la construcción de regiones por superposición cartográfica. Desde un punto de vista cuantitativo estas asociaciones pueden ser medidas a través de coeficientes de correlación en las unidades espaciales del área de estudio.
- *Interacción espacial:* Es la estructuración de un espacio relacional en el cual las localizaciones (sitios), distancias (ideales o reales) y vínculos (flujos) resultan fundamentales en la definición de espacios funcionales. Corresponde a los principios básicos del análisis sistémico desde un punto de vista espacial.
- *Evolución espacial:* Corresponde a la incorporación de la dimensión temporal a través de las transiciones de configuraciones espaciales de un momento a otro. Los estudios geográficos son básicamente abordajes del presente. El tiempo hacia el pasado nos muestra cómo fue la génesis de las configuraciones presentes y existen modelizaciones que pueden proponer situaciones a futuro. Centrarse en el dónde corresponde a una visión basada en la localización y en el cuándo en una visión basada en el tiempo. El cómo, desde un punto de vista espacial, presentaría el camino evolutivo espacio-temporal.



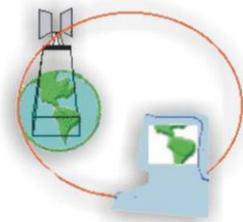
Este último principio que se centra en la importancia del tiempo es imprescindible cuando trabajamos con modelos. Buzai (2011) sostiene que si definimos la modelización como estructura de organización de datos en el interior de un SIG, esta estructura es estática y depende de la forma en que serán organizados y almacenados digitalmente las bases de datos ráster y vectoriales. En cambio, si la definimos como proceso, lleva a un modelado dinámico de datos espaciales que permite, mediante simulaciones, obtener configuraciones espaciales futuras.

En definitiva cada uno de los principios analizados involucra una visión aplicada de la Geografía que encuentra utilidad en el apoyo a la comprensión sistémica de la dimensión espacial (Buzai, 2007). Es así que la Geografía desarrolla nuevos campos de conocimiento, denominados según el autor campos emergentes, ampliando sus especialidades y dirigiéndose hacia relaciones interdisciplinarias para el estudio de temas específicos permitiendo mayor riqueza en los análisis del territorio.

La Geografía Cuantitativa como paradigma básico de las actuales tecnologías digitales genera un impacto de gran alcance en actividades de aplicación en las que aparecen dos características principales: la visión espacial como enfoque predominante y la búsqueda de resultados empíricos para actuar sobre la compleja realidad. “La expectativa es que la información resultante permita dimensionar la magnitud de las problemáticas socioeconómicas y ambientales analizadas, identificar los patrones de distribución espacial respectivos y con los elementos obtenidos faciliten perfilar acciones o políticas públicas específicas para buscar soluciones concretas” (Buzai y García de León, 2015. p.47). “Estudiar la totalidad de estos aspectos lleva a la realización de diferentes diagnósticos espaciales, principalmente de aspectos poblacionales, económicos y ambientales, que llevan a un panorama de apoyo al descubrimiento de la Síntesis Territorial (ST) como expresión máxima de la modelización de la organización del territorio” (Linares, 2016; p.19).

Sin duda los SIG han producido una revolución tecnológica e intelectual. La primera asociada al desarrollo de métodos, técnicas y procedimientos para el tratamiento de la información geográfica y la segunda asociada a forma de pensar y comprender una realidad compleja desde una componente interdisciplinar (Buzai y Baxendale, 2011).

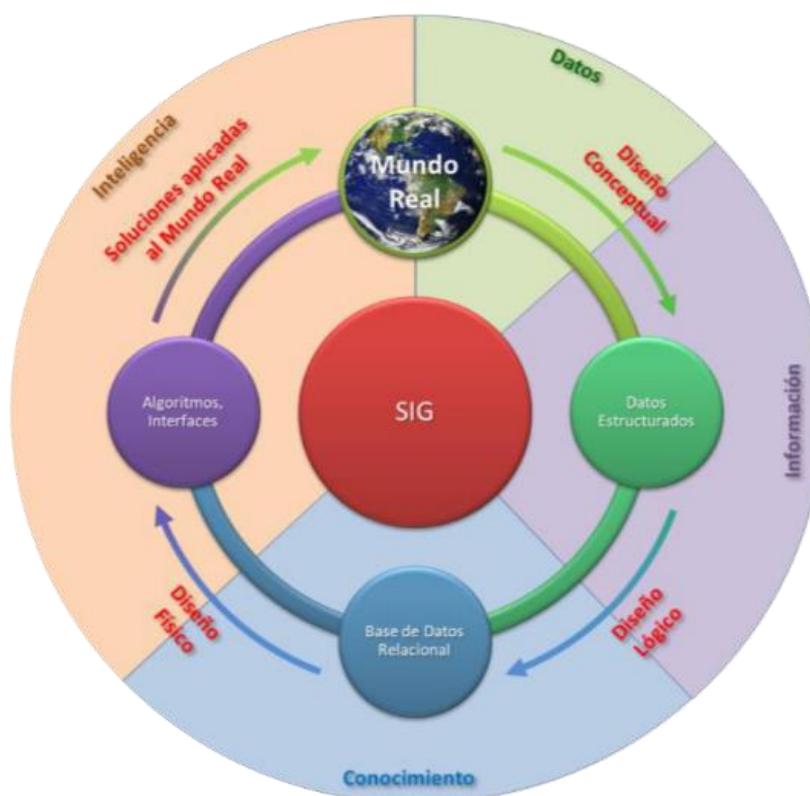
Partimos entonces de la concepción y predominio de un materialismo sistémico donde la organización del territorio y la Geografía como ciencia aplicada genera herramientas para su focalización en la dimensión espacial y los aspectos conceptuales



que sustentan diferentes niveles de análisis e intervención. “La realidad existe independientemente de los imaginarios y las construcciones textuales, y es necesario abordarla de manera empírica como procede la ciencia: partiendo de la realidad de dónde se presentan sus problemáticas y volviendo a ella para solucionarlas” (Fuenzalida Díaz, et al., 2015; p. 2). En esta línea cobra fuerza el desarrollo de herramientas, el análisis espacial y la elaboración de modelos multidisciplinares que lleven a la búsqueda de conocimientos reales en aplicaciones socialmente significativas.

El esquema de la figura n°20 refleja gran parte de las funcionalidades de un SIG centrando el eje en la dinámica de los sistemas y la modelización.

Figura n°20. Los Sistemas de Información Geográfica como Sistemas Expertos



Fuente: García. (2021)



El enfoque anterior da cuenta de las etapas que cumple un SIG como herramientas que constituyen un sistema experto (García, 2021).

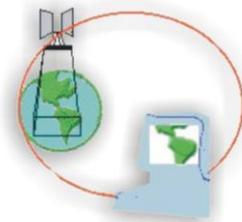
El diseño conceptual engloba los objetivos esperados (funcionalidad y aplicabilidad) según la disponibilidad de los datos requeridos (información clasificada en variables e indicadores).

El diseño lógico involucra las relaciones que existen al interior del modelo de datos clasificado. Estas asociaciones representan la descripción del “cómo funcionan los datos entre sí” y le darán un carácter de base de datos relacional, convirtiendo así los datos en conocimiento.

El diseño físico hace énfasis en el comportamiento de los datos en función de la variabilidad entre ellos, alterando parámetros y modificando el orden de las entradas dentro del modelo. Es decir, a través del conocimiento científico se describe el comportamiento de los datos según procesos físicos y urbanos. Esto se realiza mediante la creación de algoritmos que puedan simular, modelar y predecir situaciones de acuerdo unas condiciones dadas. Se crean las interfaces para que los usuarios puedan comunicarse con el sistema y obtener resultados a partir de requerimientos y parámetros.

Finalmente así queda configurado y creado el sistema experto teniendo la posibilidad de modelar situaciones y solucionar problemas con una gran cantidad de variables explicativas. “Un sistema de mapeo intenta realizar una representación fiel del mundo (inicialmente con la finalidad de inventariarlo) como modelo estático que representa un acontecimiento objetivo. Un sistema de apoyo a la toma de decisiones está orientado hacia un acontecimiento subjetivo en donde se intenta intervenir con decisiones que puedan modificar la realidad” (Buzai 2015b; p.43).

Los procesos y problemas espaciales urbanos estudiados a partir de la construcción de modelos permiten acercarnos a la realidad compleja y predecir escenarios a corto y mediano plazo. Las modelizaciones parten de información espacial y temporal determinada por nuestra escala de trabajo y las variables o indicadores de cada una de las dimensiones que permiten explicar nuestro problema de investigación. “Los trabajos de modelización, permiten obtener resultados de simulación relativos a posibles situaciones futuras. Representan distribuciones espaciales hipotéticas que generan visiones instrumentales de utilidad para el ordenamiento y planificación territorial” (Buzai 2015; p.66). El autor afirma que “el uso de simulación es una nueva



forma de aproximarse a la realidad que se encuentra entre la experiencia empírica y la teoría. La relación entre experiencia y teoría es la base de las ciencias de la simplicidad; la relación mediatizada por la simulación es la base de las ciencias de la complejidad” (Buzai 2015b; p.43).

En gestión del riesgo de inundaciones, los SIG tienen múltiples campos de aplicación. Desde aspectos del estudio de la peligrosidad, como la regionalización de datos de precipitación, la obtención de parámetros morfométricos y de la red hidrográfica, la discretización de parámetros hidrológicos, la delimitación de áreas inundables y la cartografía de riesgo hasta la adopción de medidas de mitigación de carácter predictivo, preventivo o corrector (post-desastre), que comprenden la predicción meteorológica e hidrológica, la ordenación del territorio y los sistemas de aseguramiento, y los planes de protección civil y emergencias. Asimismo podemos agregar la integración de los SIG y los sensores remotos haciendo énfasis en la detección de cambios a partir de imágenes satelitales y el análisis de transformaciones en ambientes urbanos a partir de los patrones de crecimiento y uso de suelo que afectan a la escorrentía superficial (Weng, 2001). Su empleo supone normalmente un ahorro de tiempo, esfuerzo y una garantía de objetividad y precisión (Llorente et al., 2009).

Los mapas de riesgo constituyen herramientas fundamentales de visualización e impacto para determinar rápidamente zonas vulnerables y ponderar la velocidad de un avance de amenaza, como puede ser una inundación que se avecina a zonas pobladas (García, 2015). La autora destaca los estudios con SIG diferenciando y clasificando dos tipos de amenazas. La primera, la amenaza natural causada por fenómenos naturales como por ejemplo una tormenta con lluvias ininterrumpidas o una inundación y la segunda, una amenaza antrópica o tecnológica entendida como condición de peligro que se produce en la sociedad o en el territorio a partir de cambios y o construcciones realizadas por el hombre. Aquí los ejemplos a mencionar son muchos pero tendremos en cuenta solo los referidos al riesgo de inundaciones como por ejemplo, roturas de conductos, obras de infraestructura en mal estado, construcción de viviendas y complejos urbanísticos, canalizaciones y desvíos inadecuados, etc. Solo habiendo amenaza y vulnerabilidad puedo hablar de hacer un cálculo aproximado al riesgo. Si sólo se dispone de un mapa de área inundada no es posible hablar de riesgo, ya que, es necesario conjugarlo espacialmente con datos de la cantidad de población expuesta, las características sociales de dicha población y/o las posibilidades de evacuación.



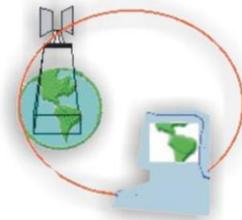
Llorente (2009) señala que cruzar entre sí las diferentes variables y parámetros que controlan la exposición y vulnerabilidad a partir de bases de datos socio-económicas de la población permite la integración de sus tres componentes: peligrosidad, exposición y vulnerabilidad; esta integración se expresa mediante la ecuación del riesgo, que combina los factores mediante un producto de ellos. Es decir que se debe calcular primero todos los factores tanto de riesgo como sus posibilidades de que el riesgo sea mayor o menor en distintas áreas del territorio. Por ello, en el ámbito de los SIG las operaciones para el análisis integrado del riesgo emplean casi siempre funciones de superposición algebraica de las coberturas que representan los componentes mediante técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC), procesamiento de imágenes, autómatas celulares e inteligencia artificial para la detección de cambios o la modelización de los factores de manera integrada dentro de un software alternativo de modelización de crecidas.

3.1 Modelos hidrológicos e hidráulicos de precipitación-escorrentía. Tipologías y enfoques para su estudio

En hidrología, la utilización de modelos numéricos para representar y analizar el comportamiento de los procesos hidrológicos en una cuenca de drenaje datan de la década de 1970. De allí que se han desarrollado una multiplicidad de metodologías para predecir y simular la respuesta hidrológica ante un evento hidrometeorológico determinado o las alteraciones producidas dentro de un sistema hidrológico. Los modelos facilitan la manipulación de las variables que intervienen en el proceso de conversión lluvia-caudal, aportando datos sobre la distribución espacial de la escorrentía superficial y mejorando la calidad de la cartografía temática sobre zonas inundables y zonas con riesgo de inundación (Triviño Pérez y Ortiz Rojas; 2004).

Si sustituimos el mundo real por un sistema complejo, entonces un modelo es una representación simplificada de un sistema complejo. Un modelo siempre describe los componentes básicos y más importantes de un sistema complejo, por lo tanto, un modelo trata de representar cierta semejanza y algunas, pero no todas, características del sistema real que simula (Pascual Aguilar y Díaz Martín; 2016).

La representación de la cuenca como sistema a modelar y la estimación de la escorrentía producida en su flujo de salida (hidrograma), puede relacionarse como un



proceso agrupado en tres fases: precipitación (entradas), procesos intermedios producidos en el sistema hidrológico y producción de caudal (salidas). La simulación de un sistema hidrológico es una aproximación del actual sistema; sus entradas y salidas son variables hidrológicas medibles y su estructura se basa en el concepto de simplificación del sistema.

Los modelos matemáticos de transformación precipitación-escorrentía utilizados para simular el movimiento del agua en las zonas de llanura deben ser capaces de representar la distribución espacial del agua y las características del escurrimiento predominante en los sistemas hidrológicos no típicos (Scioli, 2009) según se identificó en el capítulo 2.1.1 en la caracterización de la cuenca urbana del Arroyo Languyú.

Algunas de las características que destaca este autor en su investigación respecto al comportamiento hidrológico de estas áreas son:

1. El escurrimiento puede tomar caminos diferentes dependiendo de la altura de agua y frecuentemente las divisorias de agua no están bien definidas;
2. Cambios pequeños en la elevación del relieve ocasionados por las acciones antrópicas (caminos, canales o hasta los surcos de arado) causan efectos de gran magnitud en la dinámica hídrica de la zona;
3. En inundaciones el escurrimiento en lámina es frecuente, a veces más que el encauzado;
4. El peso relativo del movimiento vertical del agua es mayor que en sistemas hidrológicos típicos;

De esta manera la modelización de los procesos que ocurren en una cuenca urbana puede analizarse a partir de las diferentes tipologías y clasificaciones de modelos, desde un abordaje más abstracto hacia un comportamiento y funcionamiento del sistema a una escala más real. En este caso solo haremos referencia a la forma que tienen los modelos para representar la superficie de la cuenca y el método matemático para plantear los procesos hidrológicos que analiza en la modelización del escurrimiento. Para ello, en primer lugar, se debe definir el alcance de los modelos hidrológicos y modelos hidráulicos. Los primeros pueden centrarse en una, en varias o en todas las secuencias que componen el ciclo hidrológico. Cada componente del ciclo presenta un dinamismo inherente al propio ciclo que posibilita la circulación hídrica en la superficie terrestre y convierte el desplazamiento de caudales en conducciones abiertas en el punto de encuentro de la hidráulica y la hidrología. De este modo, para comprender la escorrentía

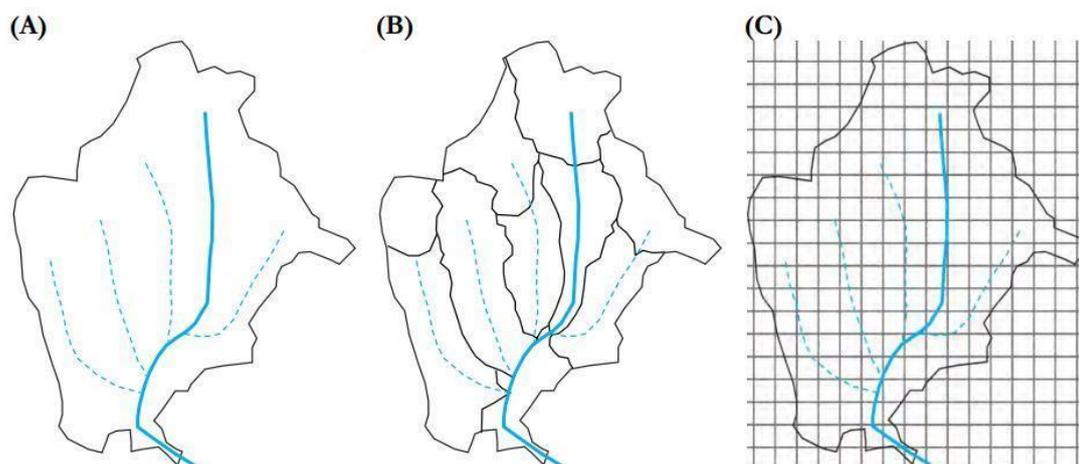


hay que recurrir inexcusablemente a los principios que rigen la mecánica de fluidos, aunque sin olvidar que el escurrimiento es uno de los múltiples procesos que se producen en las cuencas de drenaje y que se resuelven dentro del ciclo hidrológico. Esta visión sistémica posiciona a los modelos hidráulicos dentro del mencionado ciclo, cuando son aplicados al estudio del equilibrio y el movimiento del agua en los cauces (Scioli, 2009; Triviño Pérez y Ortiz Rojas, 2004).

El modelado hidrológico e hidráulico en ambientes urbanos se está convirtiendo en una herramienta relevante para predecir y evaluar los efectos de eventos de lluvias debido a la falla de los sistemas de alcantarillado (Fernández Pato y Navarro, 2018).

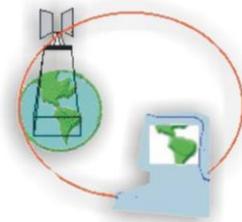
Ahora bien, según la forma de representar la superficie de la cuenca, los modelos hidrológicos pueden clasificarse en modelos agregados (figura n°21. A), semi-distribuidos (figura n°21. B), y distribuidos (figura n°21. C), (Xu, 2002; Scioli, 2009; Pascual Aguilar y Díaz Martín 2016).

Figura n°21. Tipo de modelos según la representación de la superficie de la cuenca



Fuente: Pascual Aguilar y Díaz Martín. (2016)

Los modelos agregados trabajan a nivel de la cuenca hidrográfica, la cual, se caracteriza por un conjunto pequeño de parámetros y variables. Independientemente de los procesos que considere, los parametriza como valores únicos para el conjunto de la cuenca, sin tener en cuenta su diversidad espacial. Los parámetros de estos modelos



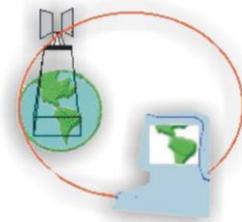
se determinan mediante una “media espacial” y la respuesta del sistema representa el funcionamiento global del mismo sin brindar información de lo que ocurre dentro.

Los modelos semi-distribuidos se construyen a partir de la unión de modelos agregados. Estos dividen la cuenca en subcuencas, agrupándolas en unidades de análisis donde los parámetros tienen similares características hidrológicas. Conforma una representación intermedia de la diversidad espacial, utilizando zonas de comportamiento teóricamente similar. Las diferentes unidades generan sus propias salidas de forma agregada y luego se unen estas salidas para conformar la respuesta del sistema completo. Ejemplos de este tipo de modelos son el HEC-HMS/RAS 2D y el SWAT (Scioli, 2009).

Los modelos distribuidos consideran explícitamente la variación espacial de la geografía y los procesos en una cuenca (HEC, 2006). Estos modelos dividen el área de estudio en porciones (celdas o grillas) donde cada una de ellas tiene su propio conjunto de parámetros y sus propias variables de estado. Cada porción recibe un flujo de materia y energía de algunas de sus vecinas que a su vez reemite a otras. Representan a la escorrentía como una respuesta hidrológica discretizada en el espacio y en el tiempo que afecta de distinta manera a toda la superficie de la cuenca. Estos modelos pueden cuantificar la variabilidad espacial de los parámetros hidrológicos y usar a éstos para analizar el proceso lluvia-escorrentía en cualquier punto de la cuenca hidrológica. A diferencia de los demás estos últimos permiten evaluar varias manifestaciones de la respuesta hidrológica en distintos sitios de la cuenca, ante distintas condiciones hidrometeorológicas, de uso del suelo y de acciones de origen antrópico. Algunos ejemplos son el GSSHA, el SSHH-I, el ATHYS, el LisFlood, el TOP MODEL y el MIKE SHE (Rentería y Stenta; 2003; Stenta et al., 2007; Scioli, 2009).

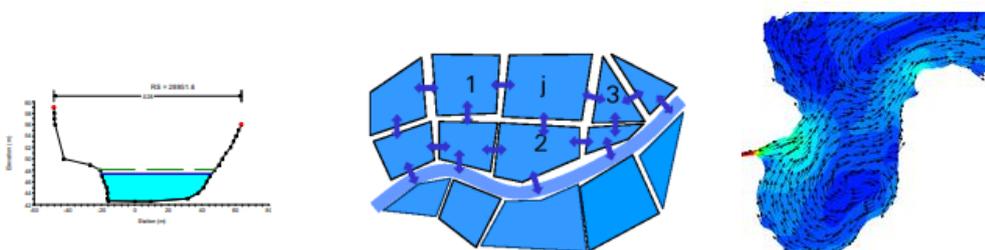
Respecto al enfoque matemático y la metodología para analizar el escurrimiento sobre la superficie del terreno podemos mencionar el aporte de los métodos unidimensionales (1D) y bidimensionales (2D) (Chow et al., 1994; Villanueva, 1999; Blade et al., 2009; Murillo y García Navarro, 2010; Gil et al., 2011; Teng et al., 2017) que se asientan en las leyes, ecuaciones y principios de la mecánica de fluidos de la ingeniería hidráulica computacional.

La modelación matemática del flujo de agua en un río consiste en predecir los valores que toman las variables hidráulicas (altura, velocidad, caudal, etc.) a partir de la resolución mediante métodos numéricos de unas ecuaciones obtenidas con una serie



de hipótesis. Para el estudio de los efectos de la propagación en cauces se pueden utilizar modelos unidimensionales, cuasi-bidimensionales o bidimensionales (Blade et al., 2014) como muestra la figura n°22.

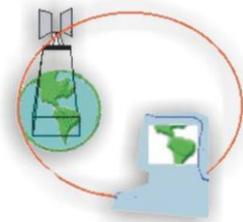
Figura n°22. Modelos 1D, cuasi 2D y 2D



Fuente: Centro de Estudios Hidrográficos, CEDEX; 2010

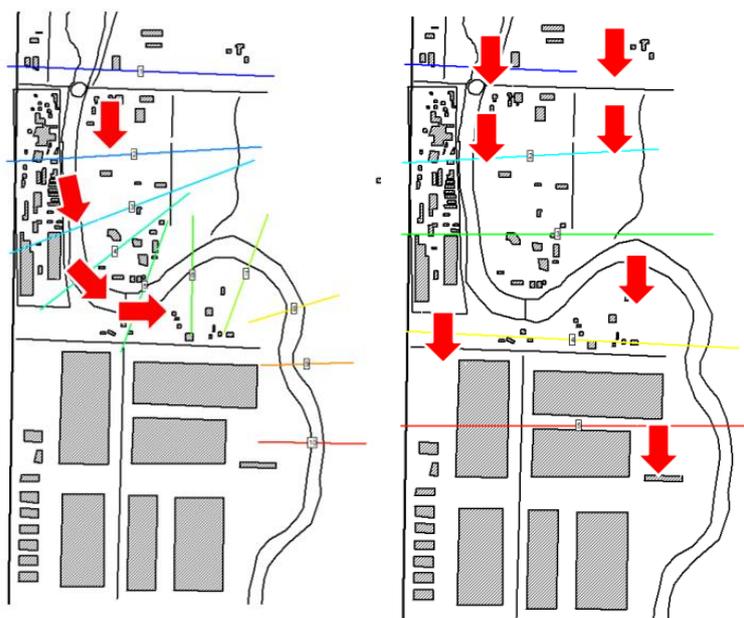
Los métodos de cálculo unidimensional (1D) se basan en esquemas numéricos relativamente simples pero eficaces en regímenes permanentes o transitorios, donde el flujo es eminentemente unidimensional (Bladé et al., 2009). El flujo de la llanura aluvial es parte del flujo del canal unidimensional; se supone que está en una dirección paralela al canal principal, y se usa una velocidad promedio de la sección transversal para representar grandes variaciones en la velocidad (Teng et al., 2017). El escurrimiento inicialmente se traza sobre los perfiles transversales del eje de cauce para regímenes permanentes. Posteriormente se anexaron complementos para cálculos en regímenes transitorios y luego las llanuras de inundación combinando modelos 1D y 2D. En los últimos años se han desarrollado un gran número de aplicaciones orientadas a la modelización de canales en 1D y combinando mapas de velocidad y profundidad mediante modelos 2D, aprovechando las potencialidades de cada uno. La representación de ambos queda expuesta en la figura n°23.

La necesidad de estudiar cada vez fenómenos más complejos, y la observación que en la naturaleza se encuentran muchas situaciones donde el flujo parece ser efectivamente bidimensional; es decir, predominan las dimensiones horizontales sobre la vertical, junto con la creciente capacidad y velocidad de los ordenadores, ha llevado al uso de ecuaciones y esquemas bidimensionales (ecuaciones de aguas someras) (Blade et al., 2014).



En los métodos de cálculo bidimensional (2D) el escurrimiento se dirige hacia ambos lados del cauce y la llanura de inundación observando los perfiles transversales que se curvan y delinean según la topografía del terreno. Es interesante interpretar que ocurre a ambos lados de cada celda según la altura y velocidad del escurrimiento. En Collazos et al., (2018) “la formulación conservativa en dos dimensiones y las ecuaciones de aguas poco profundas exige métodos numéricos sofisticados, capaces de capturar frentes o discontinuidades viajeras (saltos hidráulicos y ondas de avenida o ruptura de presa) sobre cauces inicialmente secos o de topografía muy irregular” (Collazos et al., 2018; p.2066).

Figura n°23. Representación de modelos 1D y 2D



Fuente: Villanueva. (2018)

El modelo de cálculo puede definirse mediante parámetros aproximados “*diffusion wave*” o completo “*full momentum*”. El primero es el solucionador predeterminado y permite que los cálculos se ejecuten más rápido. El segundo se utiliza para modelar ambientes urbanos y puede explicar la propagación de frentes, turbulencia y los efectos de Coriolis, por lo que, es aplicable a un conjunto más amplio de condiciones en regiones donde el perfil de la superficie del agua o la dirección del flujo están cambiando



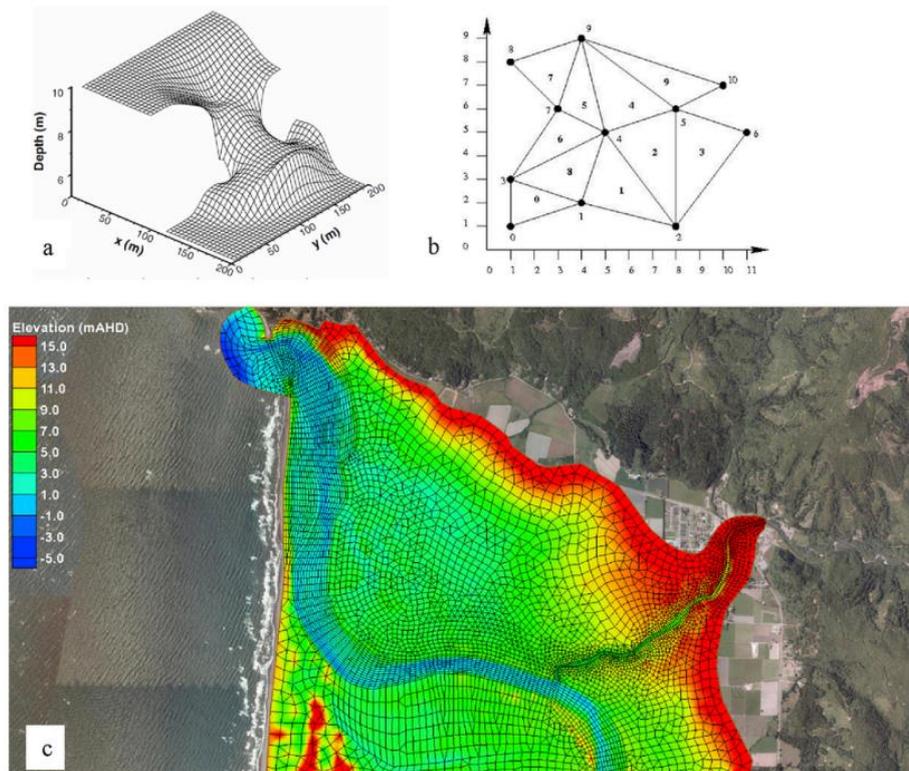
rápida. Esta condición de inestabilidad requiere más potencia computacional y, por lo tanto, resulta en tiempos de ejecución más largos.

La popularidad de los modelos bidimensionales hidráulicos viene a raíz de la elevada accesibilidad a información topográfica debido al progreso hecho en el campo de la detección remota por satélite junto a los avances tecnológicos realizados en el campo de la computación. El uso de modelos distribuidos para simulaciones de flujo superficial proporciona un cálculo más detallado de las variaciones espaciales de las variables de interés. Dentro del dominio bidimensional en la superficie, esto conduce a distribuciones detalladas de resultados numéricos, como la profundidad del agua o la descarga del flujo (Fernández Pato y García Navarro, 2018; Morales Hernández et al., 2013).

Los modelos hidrodinámicos 2D son quizás los modelos más utilizados en el mapeo de la extensión de las inundaciones y en los estudios de estimación del riesgo de inundaciones (Teng et al., 2017). En términos de representación espacial, los modelos 2D pueden usar mallas estructuradas (cuadrículas rectangulares), mallas no estructuradas (cuadrículas triangulares), y más recientemente, mallas flexibles según se observa en la figura n°24.



Figura n°24. Tipos de mallas utilizadas en modelos 2D²²



Fuente: (Teng et al., 2017)

En cuanto al paso del tiempo durante la simulación, en términos generales, los esquemas numéricos se pueden clasificar en dos grupos atendiendo a la evaluación temporal de las incógnitas: métodos explícitos e implícitos. Según Teng et al., (2017) “los modelos explícitos resuelven la unidad actual independientemente de la resolución del resto del dominio para cualquier paso de tiempo dado y en los implícitos el solucionador no puede continuar con el siguiente paso de tiempo hasta que se resuelve todo el dominio” (Teng et al., 2017; p. 4).

Collazos et al., (2018) sostiene que los cálculos de las ecuaciones de aguas poco profundas pueden ser resueltos mediante métodos explícitos, a partir de mallados estructurados y no estructurados de volúmenes finitos triangulares como usa IBER

²² Otros ejemplos podemos encontrarlos en el sitio del Dr. Ignacio Villanueva (2022) sobre leyes de conservación y mallado de dominios para simulaciones numéricas. Disponible en: <https://floodmapping.readthedocs.io/en/latest/claws.html>



(2018) y RiverFlow2D (2018) o métodos implícitos mediante mallas estructuradas cuadrangulares o cartesianas como emplea HEC-RAS (2018).

Fernández Pato y Navarro (2018) destacan que los esquemas explícitos actualizan la solución en cada celda a partir de los valores conocidos del sistema en el momento actual, mientras que los esquemas implícitos generan un sistema de N ecuaciones con N incógnitas, siendo N el número de celdas computacionales multiplicado por el número de variables a resolver para cada celda. Los esquemas explícitos están restringidos por razones de estabilidad numérica. La ventaja de usar esquemas implícitos es que, en teoría, son incondicionalmente estables, aunque pueden ser menos precisos que los esquemas explícitos para flujos no estacionarios cuando se usan pasos de tiempo grandes. Se requiere un compromiso entre la ganancia de estabilidad y la pérdida de precisión en los resultados (Fernández Pato y Navarro; 2018, p. 2). Tradicionalmente, esto constituye la principal razón para utilizar métodos implícitos en cálculos de estado estacionario. En estos problemas, la pérdida de precisión durante el estado transitorio no es tan importante, y la posibilidad de elegir un paso de tiempo mayor para la simulación a menudo permite un cálculo más rápido del estado estacionario.

Por último, si bien existen ventajas y desventajas en la utilización de cada uno de los métodos, los criterios quedarán a definir por los objetivos que se persiguen en el área de drenaje de la cuenca. Los modelos hidrodinámicos son las herramientas más utilizadas para simular dinámicas detalladas de inundaciones. Se pueden vincular directamente con modelos hidrológicos y modelos fluviales para proporcionar el mapeo de riesgo de inundaciones, pronósticos y análisis de escenarios. Se puede manipular y asignar nuevos parámetros para investigar el impacto de los cambios en las condiciones iniciales, las condiciones de contorno o la topografía para predecir nuevas hipótesis de trabajo. Son capaces de simular el tiempo y la duración de la inundación con alta precisión. Sin embargo, son computacionalmente intensivos y generalmente se consideran inviables para áreas mayores de 1000 km^2 , cuando la resolución requerida es menor a 10 m y/o en forma probabilística, enfoque que requiere múltiples simulaciones ya que el tiempo necesario para ejecutar las simulaciones puede ser prohibitivamente largo (Teng, et al., 2017; p.7). Los modelos 1D son computacionalmente eficientes, pero poseen una serie de inconvenientes asociados a la incapacidad de simular la difusión lateral de la onda de inundación, la discretización



de la topografía como secciones transversales representada como una superficie continua y la subjetividad en la ubicación y orientación de la sección transversal.

El entendimiento, acercamiento y la introducción referida a los tipos de modelos hidrológicos y la forma de trabajar mediante los enfoques de los métodos de cálculo hidráulico es importante para lograr interpretar el procesamiento y procedimientos llevados a cabo en el entorno de las herramientas seleccionadas para la cuenca del área de estudio.

Para resumir la conexión de los SIG con los modelos hidrológicos e hidráulicos ha sufrido una evolución lógica en la última década. Los SIG comenzaron a utilizarse de forma aislada a los modelos, como herramientas para regionalizar, agregar y/o calcular variables y parámetros, usando los resultados como entradas a los modelos; pero últimamente han proliferado las aplicaciones, macros, extensiones o módulos que conectan directamente SIG y modelo, y además en relación biunívoca (Llorente et al., 2009) como refleja la figura n°25.

Las funciones de introducción de datos, manipulación, procesamiento y análisis espacial dentro del entorno de los SIG permiten la representación de la variabilidad inherente en la componente espacial de sistemas naturales como los hidrológicos. La obtención de parámetros hidrográficos (red de drenaje, delineación de cuencas, conectividad) y morfométricos (longitudes, pendientes) a partir de los DEM han sido muy importantes para vincularlos con diferentes rutinas o módulos de ArcGIS que conecta los datos hidrológicos con diversos aspectos de la modelización de los recursos hídricos y los métodos de toma de decisiones a partir de la superposición de nuevas variables como la pendiente, vegetación o usos del suelo, y tipo de suelo.

En lo que se refiere a la modelización de la componente espacial estas herramientas aceleran los procesos de desarrollo e implementación de modelos hidrológicos mediante sus aportes para la mejor interpretación y análisis de modelos y sistemas (Morad y Triviño, 2001). Los autores destacan que las estructuras y operaciones de los SIG garantizan que no se pierda la coherencia espacial en ninguno de los pasos de la modelización. “Los valores de entrada, intermedios y de salida preservan en todo momento la georreferenciación y sus relaciones topológicas. Además, el usuario no está obligado a trabajar con la totalidad del sistema, sino que puede determinar qué procesos están sucediendo y qué salidas se están generando en cualquier localización del área estudiada” (Morad y Triviño, 2001; p.29).



Figura n°25. Conexiones entre modelos hidrológicos, hidráulicos y los SIG



Fuente: elaboración personal

Según Molero (2012) aunque los SIG no son instrumentos diseñados para la simulación mediante modelos matemáticos, ya que no se prestan con facilidad a estudios dinámicos al no disponer de representación explícita de la variable tiempo, son herramientas que facilitan el pre y postproceso de la información espacial que maneja un modelo hidrológico hidráulico. Por ejemplo, en el estudio de un cauce, los SIG se utilizan para el estudio hidrológico y cálculo de caudales previo al cálculo hidráulico, para regionalizar o agregar las variables y parámetros y para utilizar sus resultados (archivo de geometría) como entradas del modelo. El flujo es modelizado con un software diseñado específicamente para ello, como el HEC-RAS, en este caso, y posteriormente, las salidas de este modelo son nuevamente exportadas a un SIG para su procesamiento y representación gráfica. La representación de la llanura de inundación para un caudal de período de retorno dado es posible únicamente mediante esta técnica (Molero, 2012).

En esta línea, en sintonía con Llorente et al., (2009), ambos autores mencionan el surgimiento de las conexiones entre los programas del HEC (HEC-RAS por citar uno de ellos) con los productos ESRI (primero ArcINFO y ArcView y posteriormente ArcGIS), a través de las extensiones HEC-GeoRAS, respectivamente. Ambos software permiten conectar el SIG y el modelo hidráulico unidimensional en una doble dirección: desde el DEM (TIN) se extrae la información geométrica necesaria que, una vez empleada en



HEC-RAS, permite ser de nuevo exportada al SIG para obtener zonas inundables, batimetrías o velocidades.

Las mayores innovaciones en el análisis de la peligrosidad de inundaciones en los últimos años han tenido como protagonista a los SIG. Sus avances son significativos tanto en la disponibilidad de los datos de partida en el estudio hidrológico como en la modelización cada vez más precisa mediante DEM y ortofotografía de alta resolución. Todas las aplicaciones para la modelación hidráulica bidimensional se apoyan en estas herramientas, tanto para dar formato a los datos de entrada, como para la implementación de los cálculos internos y los formatos de salida como los DEM de resolución media o DEM de alta precisión LIDAR o parámetros de rugosidad del terreno a la escorrentía superficial en régimen de lámina libre (valores de n ó m de Manning).

Para concluir la importancia de la aplicabilidad, transferencia y planteo de soluciones espaciales para el tratamiento de la problemática puede ser abordado desde diversas perspectivas. Una consiste en la delimitación de las áreas de riesgo de inundación, detectables a partir de la topografía del territorio y de la geomorfología de los cauces de los ríos, y en la determinación de los efectos que podrían tener en los diferentes usos del suelo que intersecan a las zonas de riesgo potencial. Otra, persigue la simulación del movimiento y la acumulación del flujo de agua de escorrentía superficial, mediante los modelos ya referidos, para la generación de la llanura de inundación esperada según el hidrograma de un evento.

A diferencia de lo que ocurre en países de Europa donde tienen un gran camino allanado en modelización de crecidas, la detección de llanuras de inundación a partir de datos de precipitaciones máximas diarias y sus relaciones con curvas IDF y los caudales máximos asociados a distintas probabilidades de recurrencia, los impactos de obras de infraestructura, estudios de velocimetría en cauces, simulaciones dinámicas y en tiempo real y la aplicación de planes de emergencia (SEPA, 2019); en nuestro país, si bien, la utilización de los modelos está adquiriendo un rol trascendental, aún restan amplios desafíos que refieren al enfoque de riesgo abordado, al componente seleccionado para modelizar en su ecuación y la importancia de una visión integrada de los factores que lo definen. Es necesario también mencionar que la disponibilidad de datos y fuentes de información para las entradas de los modelos es compleja y requiere un arduo trabajo inter, intradisciplinar y multidisciplinar. Asimismo la mayoría de las aplicaciones se centran en el estudio y análisis de áreas vulnerables a distintas escalas y no en la



simulación de posibles soluciones. El aporte de la formulación de planes integrales hidrológicos ambientales de cuencas, la evaluación de medidas semiestructurales y estructurales y los planes de protección civil que zonifica el territorio a partir de un triple análisis de peligrosidad, de vulnerabilidad e histórico sería central luego de la detección de las zonas con mayor peligro. Estos tratamientos derivarían finalmente en un instrumento de apoyo a la gestión del territorio mediante la prevención de riesgos, la planificación territorial y la confección de Infraestructura de Datos Espaciales (IDES) tan desarrollada en la Argentina. La potencialidad de los servidores OGC²³ y servicios web como WMS²⁴ y WFS²⁵ para brindar al usuario el acceso inmediato y gratuito a un visor cartográfico de zonas inundables que permita visualizar, sobre mapas catastrales y fotografías aéreas, entre otras opciones, los estudios realizados y los mapas de peligrosidad de inundaciones es la base para construir políticas públicas sustentables, disponibilizar la información de manera democrática, integrar participativamente a los actores sociales y así garantizar la aplicabilidad y transferencia de los estudios espaciales urbanos.

3.2. Potencialidades de la herramienta de modelización de crecidas HEC-RAS para la construcción de un modelo hidrodinámico bidimensional

Como bien se ha venido desarrollando en los apartados de este capítulo, la modelización hidrodinámica tiene como principal finalidad analizar el escurrimiento del agua de un cauce de un río o dentro de un área de la cuenca involucrando una serie de hipótesis y parámetros hidrológicos e hidráulicos que actuarían como restricciones y/o pesos durante el proceso de simulación. Para la simulación de crecidas estos parámetros deben integrar una serie de variables de entrada para el planteo, configuración y ejecución del modelo.

²³ Geoservicios: *Open Geospatial Consortium* (OGC)

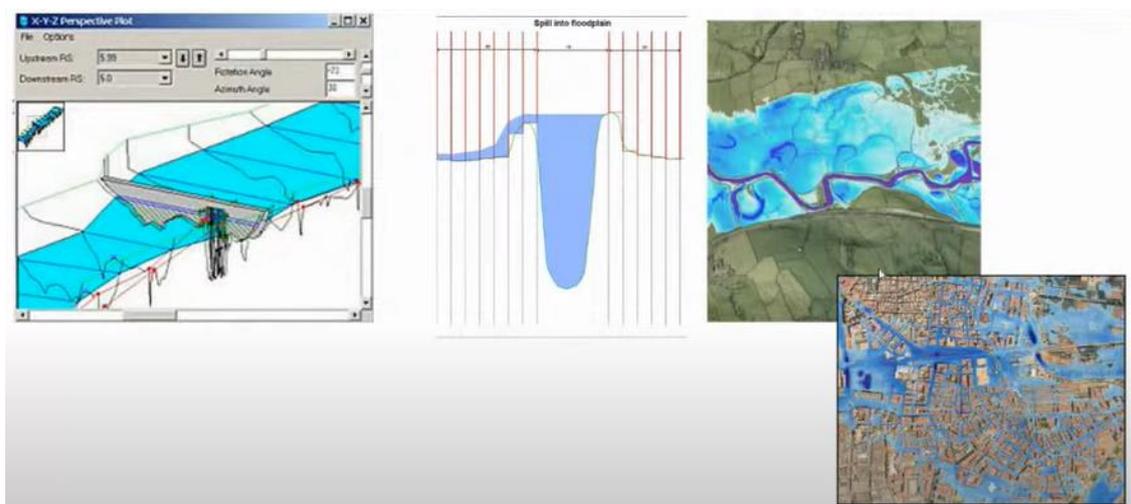
²⁴ *Web Map Service* (WMS)

²⁵ *Web Feature Service* (WFS)



El apartado 2.2.1 analiza las diferencias de la utilización de modelos para la simulación de procesos hidrológicos y mitigación de inundaciones en áreas urbanas y el desarrollo en la sección 3.1 de los distintos tipos de modelos hidrológicos e hidráulicos de precipitación-escorrentía, permite inferir la utilización de esquemas 1D, 2D o híbridos 1D/2D de acuerdo a nuestros objetivos de trabajo como referencia la figura n°26. La decisión depende de la escala de trabajo, la precisión en los resultados, el área espacial (planicie o zona de inundación a partir del cauce o cuenca urbana) y los tiempos computacionales requeridos en cada caso (hidrograma, hietograma discriminado en horas o cálculos según tiempos de retorno).

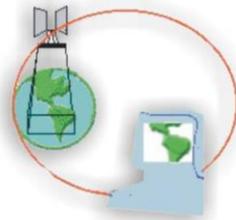
Figura n°26. ¿Modelos 1D o 2D?



Fuente: IIAMA²⁶. Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia (UPV)

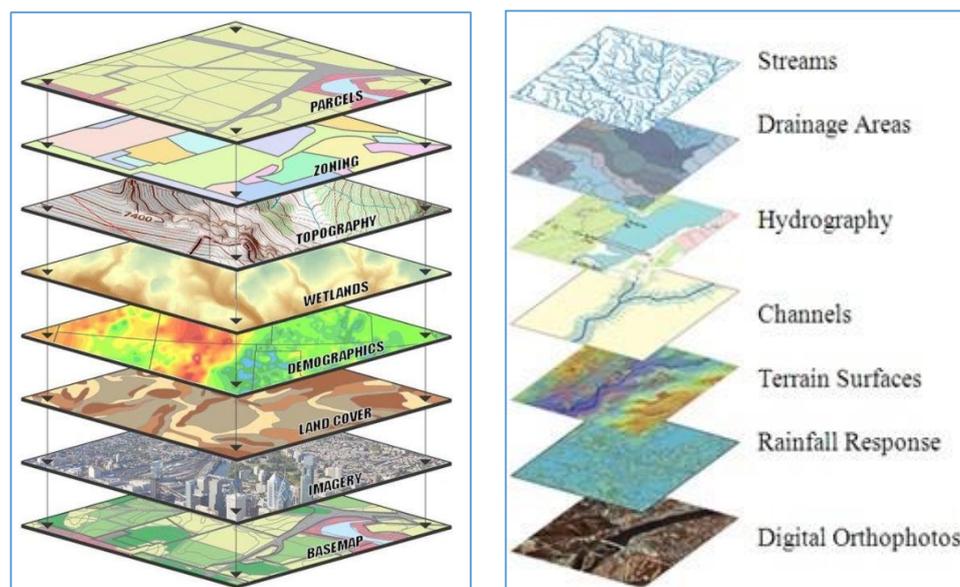
El eje central en esta investigación se centra en las dimensiones y el procesamiento de variables físicas y urbanas que se confeccionan, discriminan y analizan mediante el aporte de los SIG para la construcción de un modelo hidrológico. Su pre procesamiento y procesamiento permite exportar las capas de información (*inputs*) para luego importarlos al software modelador de crecidas y así llevar a cabo las simulaciones. La figura n°27 intenta reflejar algunas de las dimensiones y el mapeo de cada una de los

²⁶ <https://www.iiama.upv.es/>



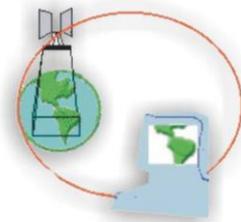
layers que formarían parte del modelo hidrológico y a mediano plazo del modelo hidrológico hidráulico.

Figura n°27. Esquema de representación del modelo de datos en superposición de capas



Fuente: <https://alfageomatics.com/2019/05/tecnicas-de-observacion-de-la-tierra-iv-sistemas-de-informacion-geografica-gis/>

El abanico de herramientas que se utilizan para extraer nueva información vectorial o raster para definir un modelo es muy diversa dentro de las Tecnologías de la Información Geográfica. Podemos trabajar bajo software de entornos libres y con licencias comerciales. En todos los casos los formatos son compatibles y pueden llevarse a diferentes escalas, permitiendo la interoperabilidad de las entidades respecto a la aplicación de una gran diversidad de funciones y obtención de resultados. Para esta investigación, en primer lugar, se utilizó como herramienta de base el programa ArcGIS 10.2 donde se procesaron los parámetros producto del modelo digital de elevación (DEM) y el derivado de la clasificación de imágenes satelitales. En una segunda instancia se ejecutaron algunas herramientas dentro del entorno HEC-GeoRAS, una extensión compatible con ArcGIS para operar con la edición de la red pluvial (red geométrica) e ingresarla como input en el software modelador de crecidas y, en tercer



lugar, simular algunos escenarios desde el HEC-RAS. Si bien es posible evaluar el comportamiento del flujo bajo un modelado geométrico de la red (modelos en 1D) y bajo un modelo digital del terreno con sus indicadores (modelos 2D) permitiendo su operabilidad dentro del entorno de HEC-RAS, en este caso, se construyeron mapas de velocidad y profundidad a partir del DTM y las variables de interés seleccionadas.

Del esquema simplificado podemos establecer entonces una primer etapa de pre procesamiento que implica compilar cada una de las entidades desde la extensión HEC-GeoRAS (HEC, 2011) disponible para ArcGIS o directamente ingresar cada variable raster o vectorial dentro de HEC-RAS y vinculada al DTM o DEM.

El primer módulo puesto a disposición por el Centro de Ingeniería Hidrológica de EE.UU define un conjunto de procedimientos, herramientas y utilidades para procesar datos geoespaciales en ArcGIS. Aquí se prepara la geometría de la red (eje de cauce/*stream and flow centerline*) y todos los atributos requeridos como por ejemplo, el trazado de secciones transversales (*cross section*), alcantarillado (*culverts*), puentes (*bridges*), diques (*levees*), ramales (*lateral or inline structure*) y obras civiles (*weirs*). Esta geometría también es posible construirla desde HEC-RAS. Para ello, es necesario considerar la importancia del dato in situ partiendo del trabajo de campo y la carga de cada uno de sus atributos, ya que el modelado geométrico de una red de flujo requiere información precisa de cada entidad a simular. Para la ciudad de Tandil existe una escasez de datos de hidráulica y la mayoría de la información disponible se encuentra en formato analógico sin digitalizar, por lo que se intentó elaborar nueva información geoespacial y confeccionar un banco de datos fiable para que a futuro sea posible incorporar en nuestras modelizaciones.

En base a lo digitalizado y a lo que se pudo preprocesar hasta el momento mediante relevamientos de campo y toma de puntos GPS, se conformó la estructura inicial de una red mediante esta herramienta.

A continuación se detallan los procedimientos llevados a cabo para plantear un escenario hipotético.

En el entorno de trabajo de ArcGIS se construyó un *Triangulated Irregular Network* (TIN) desde las herramientas ArcToolbox/3D Analyst Tools. El input necesario para ello partió de información vectorial dada por las curvas de nivel o puntos de altitud. Asimismo las mismas curvas se extrajeron desde el DEM y se compararon los resultados con un DEM obtenido mediante la lectura y edición de cartas topográficas. Las rutinas llevadas

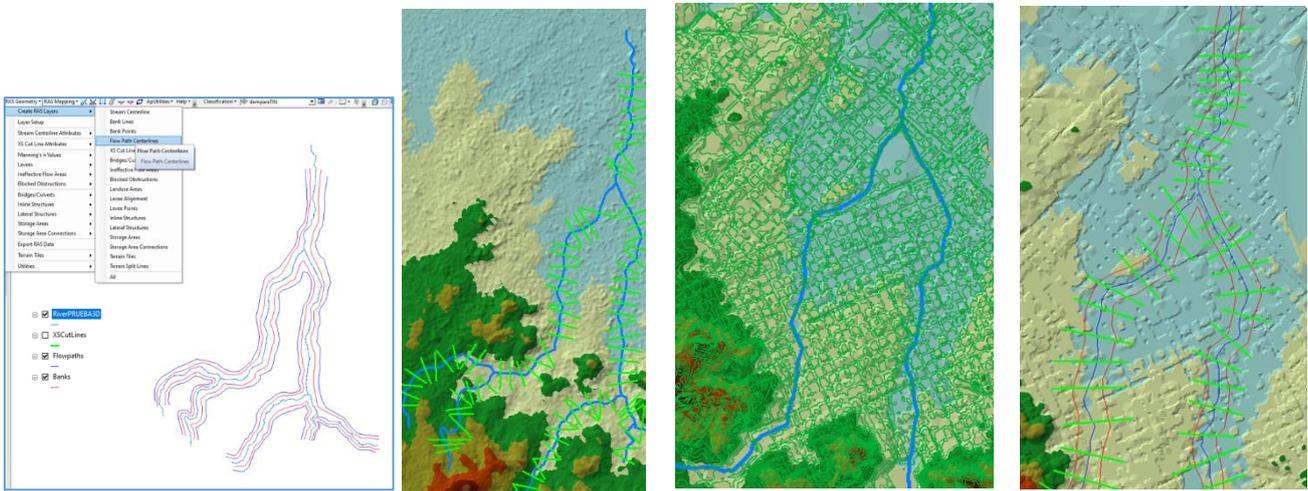


a cabo en Hec-GeoRAS intentaron reproducir fielmente la realidad del terreno teniendo en cuenta luego la integración de la superficie edificada en el entorno de HEC-RAS.

Mediante la extensión de HEC-GeoRAS (RAS Geometry) se crearon las entidades vectoriales necesarias para confeccionar la red geométrica tal como se visualiza en la figura n°28 A y B. El cauce del río (*Stream Centerline*) se trazó desde aguas arriba hacia aguas abajo. Los nodos de cada eje deben estar topológicamente conectados asignando una categoría al cauce principal y sus tributarios u órdenes para que no haya inconsistencias cuando se delimiten las condiciones de borde o contorno para la simulación. Inmediatamente se digitalizan los márgenes del río (*Banks*) tanto izquierdo como derecho, el sentido del flujo (*Flow path layer*), el cual, coincide con la delimitación de los *banks* pero se edita cada entidad asignándole si pertenece al margen izquierdo, centro o derecho (*Left, channel o right*) y, por último, la edición de las secciones transversales (*XS cut lines*). Su digitalización debe pensarse en base a algunos parámetros como el número de secciones (298 como máximo), el trazo a lo largo del eje del cauce ubicándose de manera perpendicular al mismo y un poco distantes entre sí. Pueden construirse de forma manual, automática o interpolando secciones existentes pero es necesario generarlas de izquierda a derecha, a una cierta distancia según el sentido del flujo y recorrido de la red, que no implique grandes desniveles topográficos y de pendiente. En modelos hidrológicos complejos es muy importante que estas secciones se ubiquen donde se producen variaciones significativas en las condiciones hidráulicas, siendo el caso de las zonas con pérdida de carga y espacios con importantes cambios en la pendiente o en el coeficiente de rugosidad de manning e incluso considerar la presencia de obras de infraestructura civil por la necesidad de generar otro tipo de resultados. El coeficiente determina cambios en la velocidad del escurrimiento en las zonas anegadas debido a las diferencias de rugosidad del terreno en esas áreas. Por lo que puede aumentar, disminuir o permanecer sin alteraciones durante un evento.



Figura n°28. Construcción de la red geométrica en HEC-GeoRAS



A: En TIN

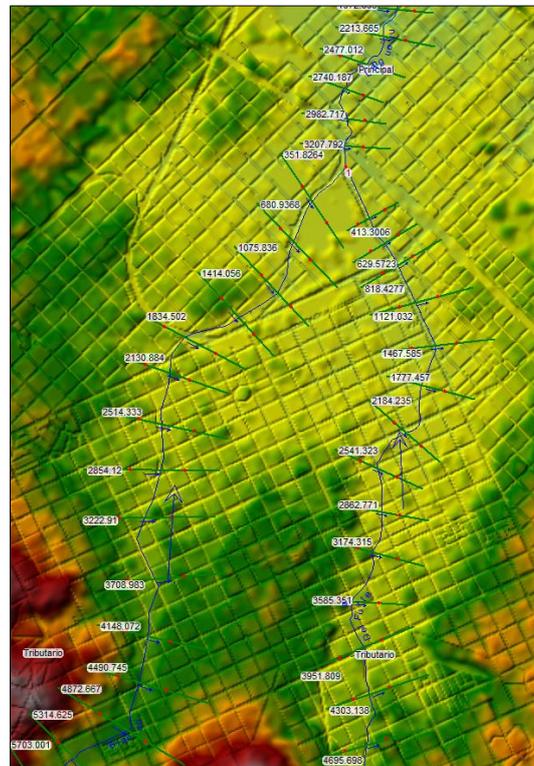
B: En DTM

Fuente: elaboración personal. ArcGIS 10.2

Finalmente todas las entidades y atributos de la red deben guardar una relación topológica (conexión entre ejes y nodos) integrando las elevaciones del TIN con el objetivo de ejecutar cálculos hidráulicos y así conformar la estructura final de la red, la cual, será importada a HEC-RAS en formato GIS como evidencia la figura n°29. Cada sección transversal tendrá sus parámetros hidrológicos y coeficientes que intervendrán en la simulación del flujo o caudal permanente o semipermanente según las condiciones de borde (aguas arriba/aguas abajo) y las hipótesis de trabajo planteadas para el escenario.



Figura n°29. Importación de la geometría de la red en HEC-RAS



Fuente: elaboración personal. RAS Mapper. HEC-RAS 5.0.3

Las rutinas desarrolladas anteriormente permiten detectar en esquemas 1D zonas de anegamiento sobre el eje del cauce de un río o arroyo. Ahora bien, la etapa de precisión, calibración y ajuste de este modelo implicó que los escenarios se elaboren mediante la presentación de esquemas de modelación 2D. Estas hipótesis parten de trazar una malla o área de mallado dentro de la cuenca o llanura de inundación objeto de estudio.

El software River Analysis System (HEC-RAS) disponible en forma gratuita y desarrollado por el Centro de ingeniería hidrológica (HEC, 2016a; 2016b) en su versión 5.0.3 y recientemente incorporada la versión 6.0 (HEC, 2020; 2021a y 2021b) permite realizar cálculos hidráulicos en cauces de ríos bajo flujo unidimensional constante 1D e inestable 2D. En otras palabras, por un lado, determina el escurrimiento superficial y el movimiento del agua en canales (desde la geometría) y, por otro, permite utilizar su interfaz RasMapper donde se inicia el proceso de modelación en 2D y es posible apreciar los resultados de forma interactiva para luego exportarlos y analizarlos dentro



de un SIG. Su nueva versión 6.0 suma los cálculos de lecho móvil/transporte de sedimentos, ya incluidos en la versión 5.0.3 y 5.0.7, y el modelado de temperatura/calidad del agua para otras aplicaciones.

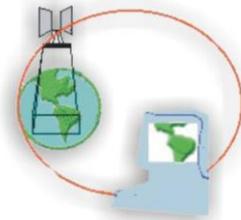
Emilio Molero (2012) plantea que la modelización matemática del flujo de agua en un río consiste en conocer los valores que toman las variables hidráulicas (caudal, profundidad y velocidad) mediante la resolución por métodos numéricos de unas ecuaciones obtenidas a partir de una serie de hipótesis. Una vez conocidas estas variables en una serie de cortes transversales a lo largo del eje del río será posible la delineación de la superficie ocupada por el agua sobre un modelo digital de elevaciones.

El objetivo primordial del modelo es obtener la altura del agua en ríos con regímenes permanentes o de flujos discontinuos calculando el área mojada de las secciones transversales (Triviño y rojas, 2004).

La importancia de disponer de los datos para cada input es central, ya sea para modelos 1D, 2D o 1D/2D. Los trabajos de Neal, J. et al., (2012) y Pérez, J et al., (2018) permiten entender la riqueza de los modelos hidráulicos diseñados para aplicaciones a gran escala en áreas con escasez de datos. Las particularidades de cada área de estudio (río Níger en Malí y río Ranchería en Riohacha-Colombia) intentan profundizar las potencialidades de los modelos de canales de subred y la modelación 2D en regiones donde la información detallada del canal no está disponible. Sus objetivos radican en construir un modelo hidráulico computacionalmente eficiente para simular la dinámica distribuida espacialmente de la elevación de la superficie del agua, la velocidad y la extensión de la inundación en grandes dominios de datos dispersos.

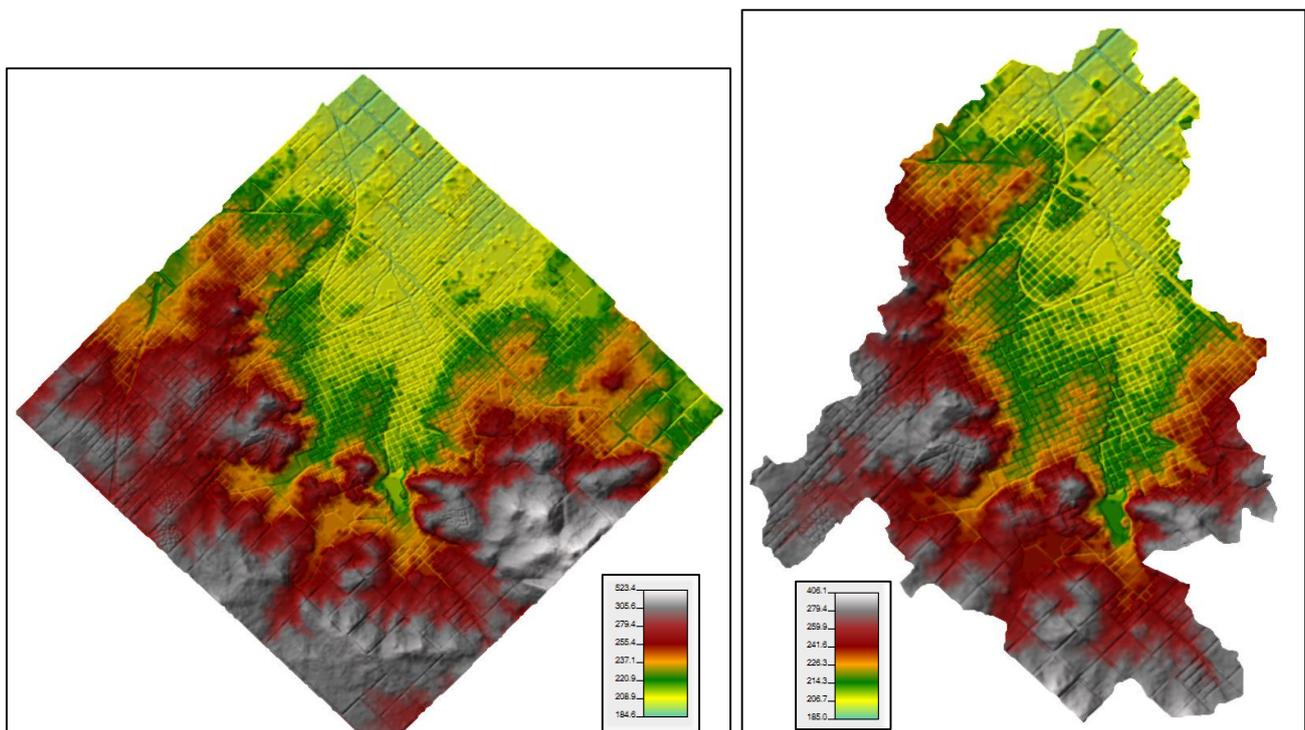
La simulación hidráulica del río y la inundación de llanuras aluviales requiere discretizar el dominio espacial en una o dos dimensiones. Como hemos visto, las limitaciones y el costo computacional que requiere su procesamiento dependen principalmente del número de dimensiones, la resolución y el tamaño del dominio espacial del modelo final. Cuando se utilizan dos dimensiones, los modelos pueden simular la propagación de ondas a través de llanuras aluviales, siempre que la topografía del modelo capture las características de control del flujo. En ambos, la información precisa queda almacenada en la estructura del DTM más allá del software utilizado.

En HEC-RAS la interfaz RASMapper permite importar el DTM y todos los inputs que intervendrán en la modelización del evento. En este caso es posible utilizar información de base obtenida mediante un DEM sumando nuevos parámetros y restricciones o



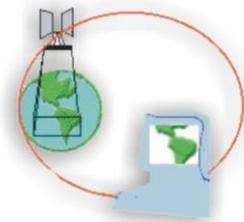
construir modelos de alta resolución para obtener un DTM procesado mediante los vuelos de drones. La figura n°30 muestra el DTM de 12.5 m de resolución (DEM SRTM ALOS PALSAR) procesado y mejorado a partir de la aplicación de un filtro kernel para corregir algunas imperfecciones o vacíos del DEM original y la integración de las manzanas urbanas de la circunscripción I. El objetivo que se persiguió fue determinar las arterias viales primarias y secundarias asignando una elevación de 5 m para que el escurrimiento pueda visualizarse y forzarse hacia la dirección de la pendiente. El DTM resultante fue recortado sobre la región de interés definida por la cuenca urbana que recorre la ciudad de SE-NO.

Figura n°30. Modelo Digital del Terreno de la circunscripción I y recorte a la cuenca urbana Langueyú



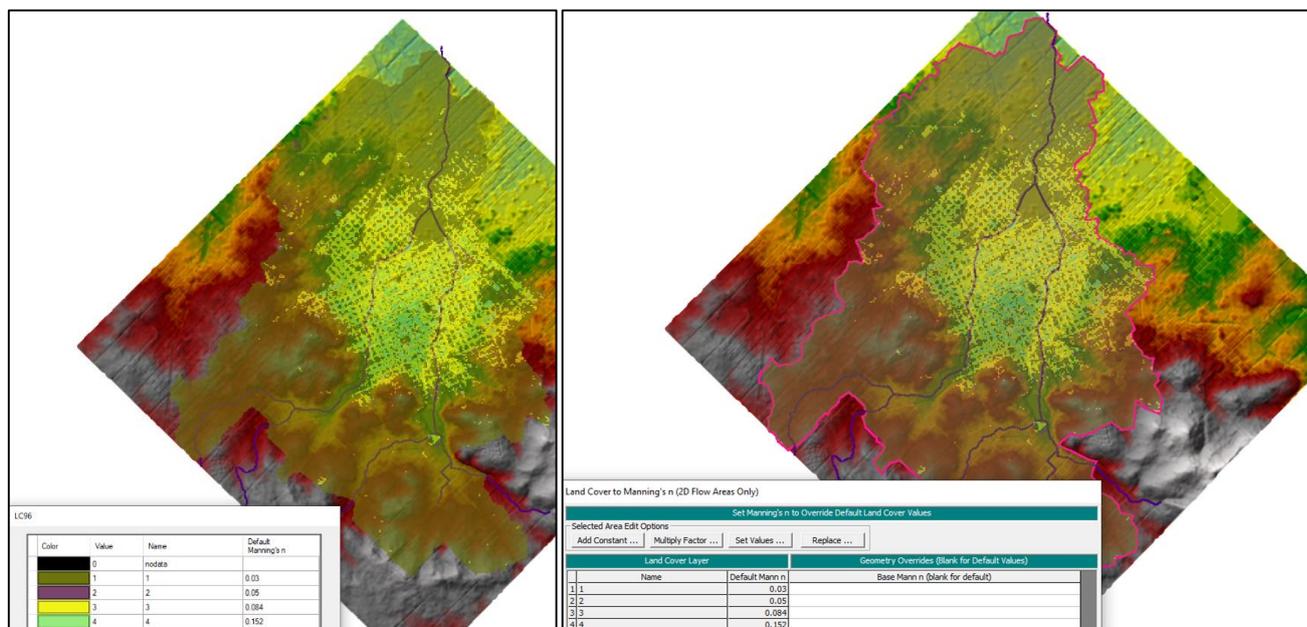
Fuente: elaboración personal. RAS Mapper. HEC-RAS 5.0.3

La cobertura de usos de suelo, el grado de densidad urbana y su relación con el código de zonificación en áreas urbanas constituyen variables muy importantes a la hora de evaluar impactos y planificar estrategias de acción para analizar la vulnerabilidad y



exposición de la población frente a una amenaza. En el modelo se diferenciaron coeficientes de rugosidad que influyan en el escurrimiento superficial y en la detección de nuevos anegamientos durante la modelización. A partir del mapa de densidades urbanas donde se materializa el crecimiento de la superficie edificada para los años 1996 y 2011 se asignaron diferentes valores n de Manning representando una tipología del terreno e indicando una restricción de menor o mayor costo de escurrimiento. Los criterios de selección dependieron del material de cubierta del suelo para cada densidad (baja a alta) y recurriendo a la revisión de coeficientes estandarizados que se manejan en las tipologías o coberturas de uso (HEC-RAS, 2016a y HEC-RAS, 2016b) y en áreas de estudio de la región (Collazos et al., 2018). Si bien se probaron varios tipos de coeficientes de rugosidad para observar las variaciones; la topografía del terreno, la pendiente, la geomorfología y el grado de densidad urbana determinaron los siguientes valores para ambos años de análisis: uso 1: 0,03, uso 2: 0,05, uso 3: 0,084 y uso 4: 0,152, tal como se explicita en la figura n°31.

Figura n°31. Asignación de coeficientes de rugosidad según variables físicas y densidades urbanas

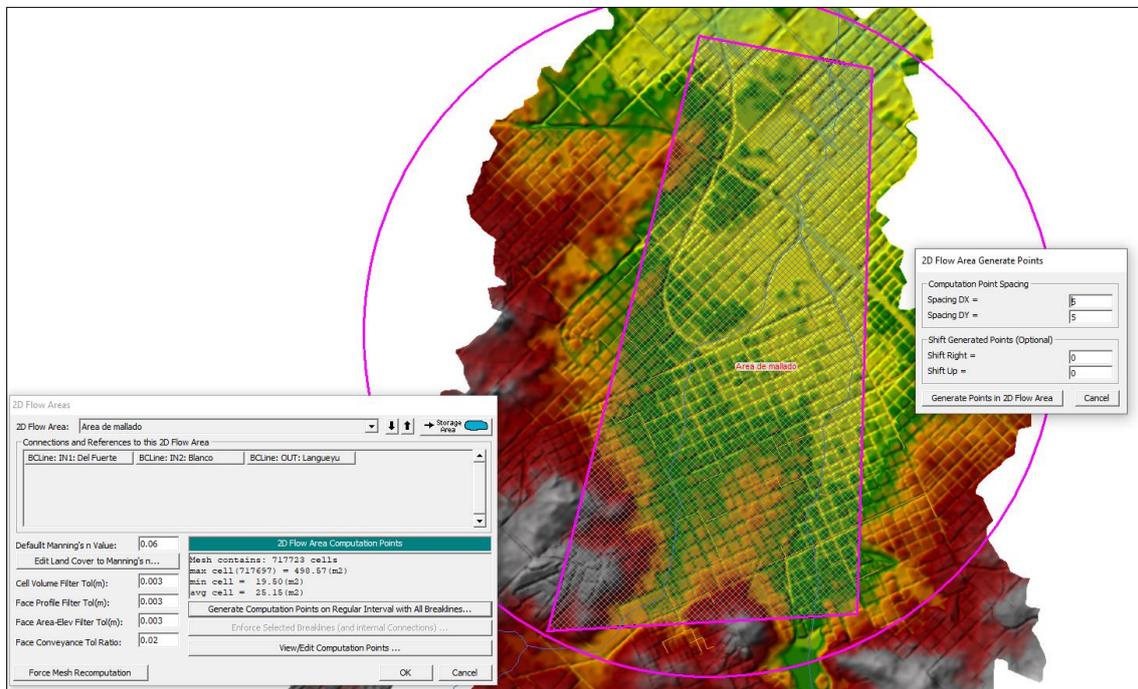


Fuente: elaboración personal en base a procesamiento con HEC-RAS 5.0.3

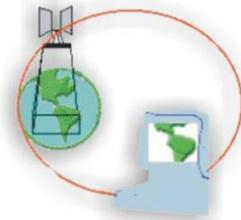


La ponderación de los coeficientes dentro de la cuenca urbana intenta reflejar algunas características del terreno para actuar como restricciones o favorecer el comportamiento del escurrimiento superficial cuando se configure el área de mallado a simular. Desde la pestaña de edición de geometría se traza la superficie (*2D Flow Area*) y se determina su tamaño (*DX/DY*), tal como se evidencia mediante la figura n°32. En áreas donde exista variación significativa de la pendiente, presencia de obstáculos que alteren las variables a modelar puede utilizarse un mallado más fino. Estos indicadores son importantes cuando contamos con información de las estructuras en línea o lateral que configuran la ciudad, por ejemplo, represas o diques, puentes, alcantarillas o desvíos, etc. En cualquiera de los casos otorgan pesos dentro de la simulación y determina cómo escurre el agua por el terreno, como así también, las zonas que constituyen áreas de almacenamiento.

Figura n°32. Delimitación del área de mallado a modelar



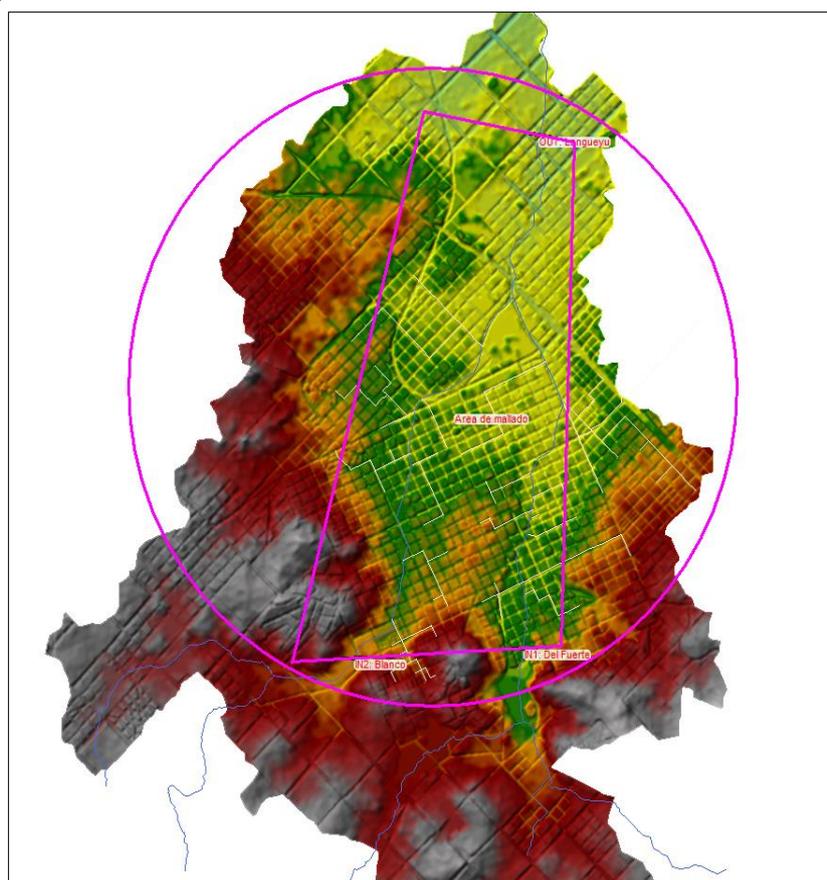
Fuente: elaboración personal en base a procesamiento con HEC-RAS 5.0.3



La figura anterior refleja la utilización de mallas de 5 x 5 m para los escenarios 1996 y 2011. Posteriormente se cargaron los parámetros de Manning definidos anteriormente (*Land Cover to Mannings*) y se procedió a delimitar las condiciones de contorno de entrada y salida del flujo (*2DFLOWConditionboundary*) según muestra la figura n° 33. En esta etapa se establecieron las fuentes (*sources*) y los sumideros (*sinks*) para modelar el flujo de escurrimiento según el área.

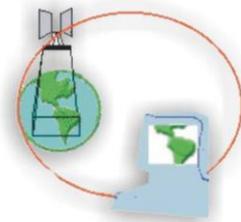
Como se observa en la figura se definieron los *IN* y *OUT* indicando dos fuentes o entradas, en este caso, sobre el arroyo Blanco y el arroyo del Fuerte y, un sumidero o salida, en el Arroyo Langueyú.

Figura n°33. Definición de las condiciones de contorno del área de mallado



Fuente: elaboración personal en base a procesamiento con HEC-RAS 5.0.3

Finalmente el último eslabón de la modelización lo conforma el evento de precipitaciones y el tipo de análisis del flujo hidrográfico. El ingreso del hietograma o

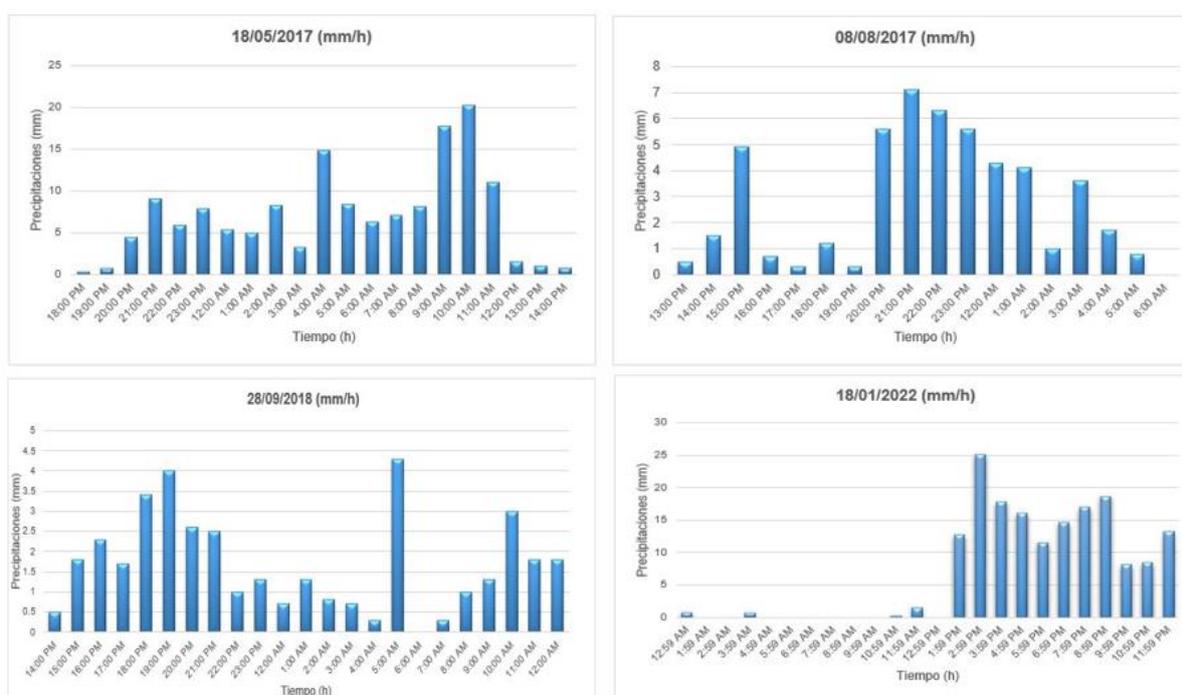


hidrograma se realiza de dos maneras. Por un lado, podemos simular el flujo para caudales permanentes o estables (*Steady Flow Data*) y, por otro, para flujos semipermanentes, variables, inestables o indeterminados (*Unsteady Flow Data*). La decisión varía por la información del evento definido por un caudal permanente (m^3/s) o por su intensidad según fracción de tiempo.

La elaboración del escenario para el análisis del evento coincidió con la fuente de datos disponible. Se utilizaron los registros obtenidos por las estaciones meteorológicas *NET ATMO* y se recurrió a las fuentes de información alojadas en la plataforma *Weather Underground*²⁷.

El gráfico n°1 muestra 4 hietogramas hipotéticos construidos mediante la información de los eventos del año 2017, 2018 y 2022.

Gráfico n°1. Hietogramas de los eventos de mayo y agosto (2017), septiembre (2018) y enero (2022)



Fuente: elaboración personal en base a la plataforma Weather Underground

²⁷ Disponible en: <https://www.wunderground.com/>

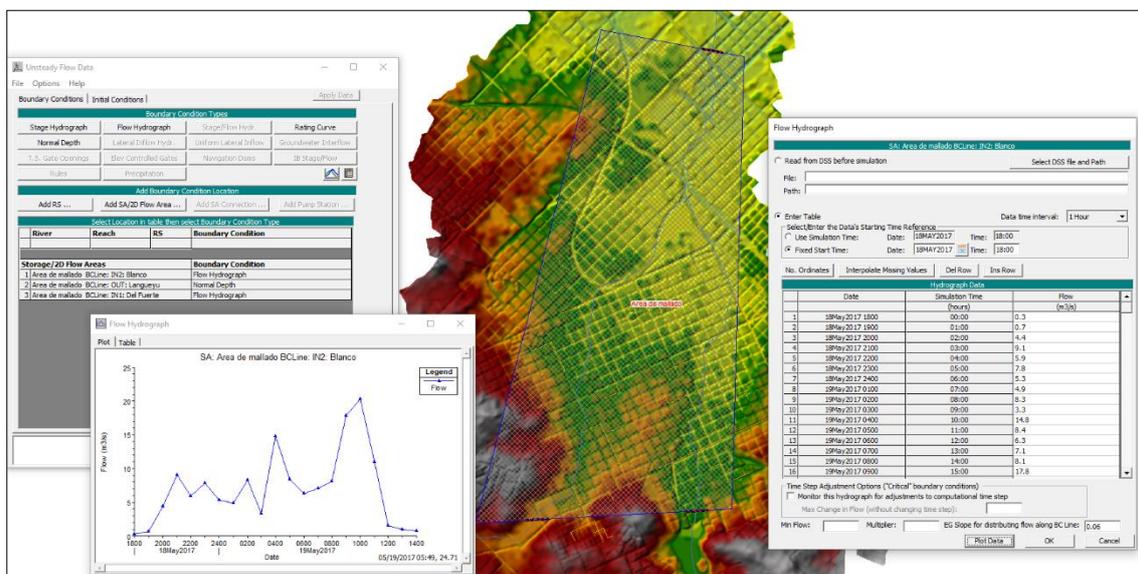


El cálculo partió de considerar los valores de precipitaciones acumuladas diarias (hs) para luego extraer la precipitación neta aproximada, resultante de la diferencia del valor máximo por hora respecto al obtenido en la hora anterior.

Para llevar a cabo el escenario de los dos momentos comprendidos en 1996 y 2011 se seleccionó el hietograma del 18/05/2017, ya que fue el evento que registró una mayor intensidad, duración y causó graves impactos en el área urbana y complementaria de la ciudad.

En la figura n°34 se visualiza la incorporación del hietograma que indica la fecha del evento, el tiempo de simulación (hs) y el flujo hidrográfico en mm^3/s .

Figura n°34. Introducción del hietograma mediante HEC-RAS



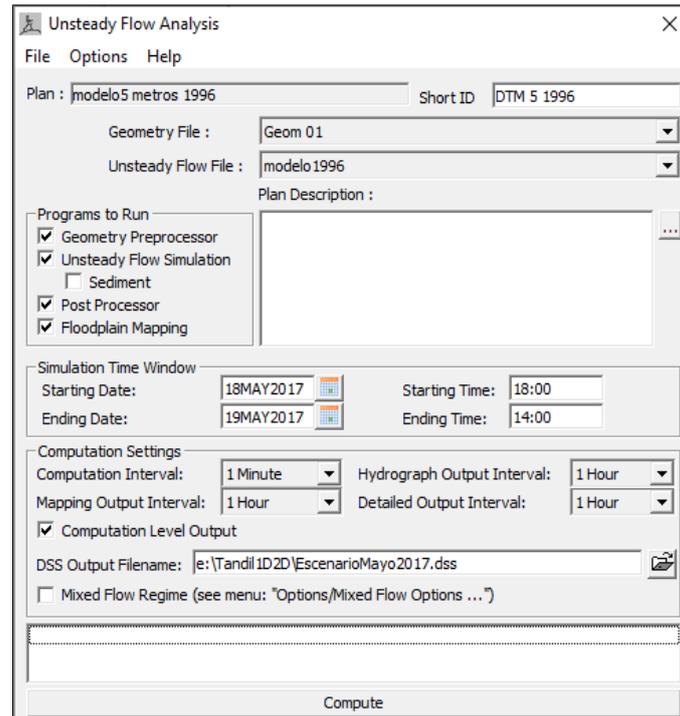
Fuente: elaboración personal en base a procesamiento con HEC-RAS 5.0.3

Los parámetros de configuración de la simulación define la presentación de las salidas del modelo teniendo en cuenta el tiempo de computación y mapeo del escurrimiento superficial estático y dinámico como puede observarse en la figura n°35. El paso del tiempo en el entorno de HEC-RAS determinan los últimos ajustes para

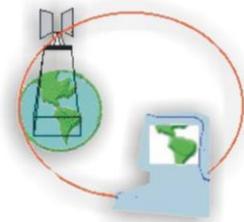


modelar el evento sobre el área de mallado de la cuenca urbana y analizar las áreas de anegamiento a partir de dos indicadores centrales del peligro: velocidad y profundidad.

Figura n°35. Configuración de los resultados de la simulación



Fuente: elaboración personal en base a procesamiento con HEC-RAS 5.0.3

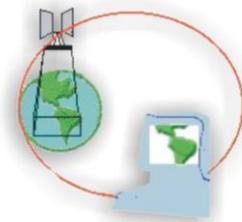


4. Esquema de interpretación del riesgo: peligro y vulnerabilidad

Las inundaciones pueden establecer condiciones de peligro a la población expuesta a partir de su vulnerabilidad social, económica, material y ambiental. Estas condiciones determinan la presencia de un riesgo que puede variar considerando los impactos de la amenaza y el grado de afectación en el medio construido.

A lo largo de cada uno de los apartados hemos recorrido la concepción y definición del riesgo en términos teóricos y las políticas de intervención y actuación según sus dimensiones y abordaje metodológico a partir del modelo de datos planteado. En esta sección nos centraremos en su interpretación desde la gestión del peligro a partir de una mirada aplicada basada en la construcción de una escala técnica del riesgo.

En áreas urbanas el aumento del escurrimiento es especialmente crítico ante las implicancias que genera un evento con características extremas, no sólo evaluando su intensidad sino también su duración y recurrencia. La lluvia se concentra en pocas horas generando inundaciones en los sectores topográficamente más deprimidos e impactando en las viviendas, afectando sus condiciones estructurales, saturando la red de alcantarillado y desagües, provocando erosión de márgenes de los esteros y canales, y alterando la calidad del agua (Melesse y Wang, 2007; SEPA, 2019; Costabile y Costanzo, 2019; Beevers et al., 2021). La existencia de esta amenaza genera incertidumbre entre la población vulnerable que proviene del hecho de saber que existe un fenómeno potencialmente capaz de generar un evento adverso y, al mismo tiempo, no cuenta con información certera sobre él (capacidad de generar daño, frecuencia, recurrencia, extensión de impacto, etcétera). Por lo tanto, el desarrollo de modelos y la implementación de herramientas geotecnológicas que permitan detectar, analizar, interpretar y evaluar el riesgo son fundamentales para prever este tipo de eventos. A continuación se explica el esquema de interpretación y una primera aproximación para el análisis del peligro y representación del riesgo de inundaciones en áreas urbanas.



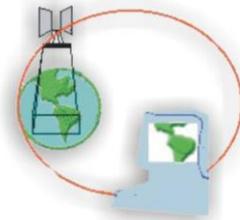
4.1 Escala de riesgo de inundaciones y directrices para la gestión del peligro. Australian Emergency Management (AEMI 2013)

La gestión de inundaciones se considera un proceso complejo donde interactúan aspectos hidrológicos, hidráulicos, geotécnicos, ambientales, económicos y sociales. Como complemento utiliza un sistema para la toma de decisiones basado, principalmente, en herramientas de modelado debido a la complejidad que envuelve las temáticas vinculadas a inundaciones. Modelos de teledetección satelital, modelados en SIG para simulaciones (hidrológicas, hidráulicas, meteorológicas) son algunos ejemplos para el análisis de riesgo e implementación o evaluación de políticas públicas (Ahmad y Simonovic, 2006).

La guía Australian Emergency Management Institute del Instituto de resiliencia australiana ante desastres para la gestión y monitoreo de inundaciones (AEMI, 2013) expone una escala técnica de peligro de riesgo para cuantificar el peligro mediante la determinación de umbrales. Si bien la elaboración de este manual alinea la estrategia y política nacional de resiliencia ante desastres con la práctica, en particular la Estrategia Nacional para Resiliencia ante desastres y las direcciones estratégicas para los servicios de emergencia y contra incendios en Australia y Nueva Zelanda, está diseñado para ser útil en una amplia gama de peligros. Involucra desde las amenazas naturales hasta las de origen antrópico que impactan en el territorio, la salud y la población de un área de interés a diferentes escalas. Un caso de aplicación puede observarse en Costabile y Costanzo, (2019).

Los impactos de los eventos pueden ser significativos no solo para la población sino también para el medio construido afectando las viviendas, el entorno urbano, las obras de infraestructura, las redes de alcantarillado, el aumento de arrastre del material disuelto y los sistemas de comunicación. Por eso es importante comprender la totalidad de los posibles comportamientos que pueden tener las inundaciones para comprender la vulnerabilidad de la población expuesta a esos fenómenos.

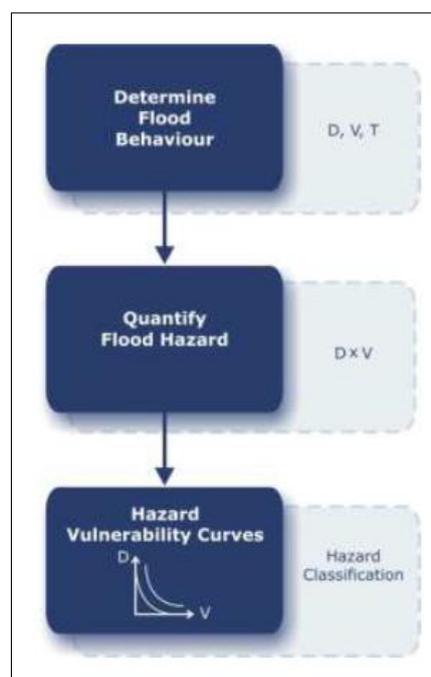
La guía técnica amplía la información sobre peligro de inundación y proporciona una base para cuantificar las variaciones en el peligro y favorecer la toma de decisiones sobre la gestión del riesgo de inundaciones. El peligro es entendido como una fuente de daño potencial o una situación con potencial para causar pérdidas y daños a la población, por lo tanto, es independiente de la población en riesgo. El grado de

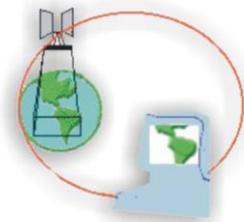


peligrosidad varía con la severidad de la inundación según su comportamiento (extensión, profundidad, velocidad, aislamiento, tasa de aumento de las aguas de inundación, duración), topografía y gestión de emergencias. De esta manera en gestión del riesgo, la evaluación del peligro ayuda a evaluar el grado relativo de peligro sin la necesidad de comprender qué es lo que está en riesgo. En suma el mapeo de peligros puede apoyar el mapeo de restricciones para estrategias de planificación del uso del suelo en áreas de llanuras.

Una forma de comprender la vulnerabilidad de las personas y/o el entorno construido ante el peligro de inundación es identificar parámetros de inundación específicos que se pueden medir consistentemente para un rango selecto de eventos de inundaciones y comparar estos parámetros con umbrales. Esto describe significativamente el peligro de inundación para las personas, edificios e infraestructura de la comunidad. Para ello se deben determinar los parámetros de comportamiento de inundaciones basado principalmente en la profundidad y la velocidad como se observa en la figura n°36 para luego cuantificar el producto del peligro de inundación. Esto puede proporcionar un método útil para categorizar espacialmente el riesgo de inundaciones.

Figura n°36. Proceso para cuantificar el peligro de inundación





Dónde: D = depth (profundidad); T = time (tiempo); V = velocity (velocidad)

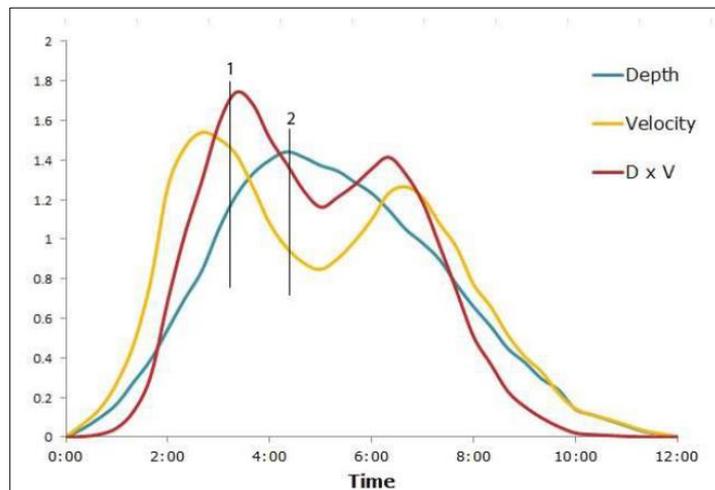
Fuente: Guía AEMI. (2013)

La guía AEMI considera que los resultados de un estudio de inundaciones dependen de la resolución espacial de la profundidad y la velocidad ejecutadas en los modelos de inundación estimados. La variabilidad del peligro debe evaluarse espacialmente a través de un rango de probabilidades. El enfoque de modelado, la escala y resolución y el nivel asociado de los detalles topográficos incorporados pueden influir en las estimaciones del peligro de inundación (Smith y Wasko, 2012; Smith et al., 2014). La escala se determina considerando el producto de la profundidad y la velocidad de la inundación ($D \times V$). Al cuantificar y clasificar el peligro de inundación, es importante comprender la relación entre el grado de peligro y el comportamiento de inundación subyacente que causa el peligro (por ejemplo, gran profundidad, alta velocidad, profundidad y velocidad combinadas), ya que estos pueden requerir diferentes enfoques de manejo.

El gráfico n°2 muestra la representación de las curvas de profundidad, velocidad y el producto de ambos. La profundidad se mide en metros (m) y la velocidad en m/s; por lo cual, $D \times V$ resulta en m^2/s . Los valores altos de $D \times V$, más allá de los umbrales de riesgo importantes, a menudo pueden ocurrir en la rama ascendente de la crecida y son una consideración importante en las evaluaciones de peligro de inundación. Por eso requiere cuantificar el peligro en todas las etapas del hidrograma de inundación, no solo en el punto máximo del hidrograma de caudal de crecida o en el momento del nivel máximo de crecida.



Gráfico n°2. Representación de $D \times V$ en un hidrograma de un evento de inundación



Fuente: Smith y Wasko. (2012)

Finalmente resta clasificar los peligros de inundaciones vinculados a umbrales de peligro significativos que se relacionan con la vulnerabilidad de la comunidad al interactuar con las inundaciones.

La tabla n°4 clasifica las amenazas de un posible evento según el grado de peligro para la población y el medio construido y la tabla n°5 refleja la clasificación de umbrales de vulnerabilidad.

Tabla n°4. Amenazas según umbrales de vulnerabilidad

Clasificación del peligro y vulnerabilidad	Descripción
H1	Generalmente seguro para vehículos, personas y edificios
H2	Inseguro para vehículos pequeños
H3	Inseguro para vehículos, niños y ancianos
H4	Inseguro para vehículos y personas
H5	Inseguro para vehículos y personas. Vulnerabilidad y daños en algunas estructuras de edificios
H6	Inseguro para vehículos y personas. Todas las estructuras de edificios son consideradas vulnerables

Fuente: Guía AEMI. (2013)

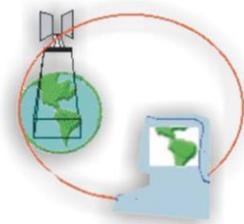


Tabla n°5. Curvas de amenaza combinadas: límites de clasificación de umbrales de vulnerabilidad

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	$D*V \leq 0.3$	0.3	2.0
H2	$D*V \leq 0.6$	0.5	2.0
H3	$D*V \leq 0.6$	1.2	2.0
H4	$D*V \leq 1.0$	2.0	2.0
H5	$D*V \leq 4.0$	4.0	4.0
H6	$D*V > 4.0$	-	-

Fuente: Guía AEMI. (2013)

El análisis y determinación de los umbrales de vulnerabilidad para definir la escala de peligro es la que se tendrá en cuenta para interpretar los resultados de esta tesis durante la modelización de los escenarios para 1996 y 2011. Si bien las amenazas se aplican a una escala de trabajo regional y a una gran magnitud de impactos, la dimensión de un evento de inundación mediante la guía AEMI sentará las bases para replicar los límites de umbrales establecidos, incorporar nuevas variables de interpretación o en la construcción del modelo y analizar el producto de mapas de profundidad y velocidad del escurrimiento para cuencas urbanas en zonas de llanura.

4.2 La zonificación de usos de suelo y la influencia de la infraestructura urbana de equipamientos colectivos en la detección de zonas inundables

Uno de los ejes fundamentales de la ecuación amenaza y vulnerabilidad que puede ser considerado, según nuestro esquema de modelo de datos, como origen (factor de riesgo) y como resultado (impactos) para la gestión de inundaciones es la reglamentación de usos de suelo que rige en las ciudades. Ello requiere contar con una cartografía de riesgo que señale las zonas inundables y con mayores problemas de drenaje teniendo en cuenta los impactos por el código de zonificación.

El sistema jurídico institucional y las medidas aplicadas para detectar, mitigar y generar políticas públicas de planificación territorial deben enfocarse interdisciplinariamente en el manejo integrado de las cuencas hídricas basado en



criterios de justicia ambiental, sostenibilidad y considerando la vulnerabilidad de la población expuesta.

Moreno Giménez (2010) plantea que el concepto de justicia ambiental tiene mucho en común con el de justicia territorial, pues ambos comparten un planteamiento similar: valorar la distribución de los beneficios y perjuicios generados por agentes humanos, en buena medida calificables de externalidades, entre lugares y grupos de población.

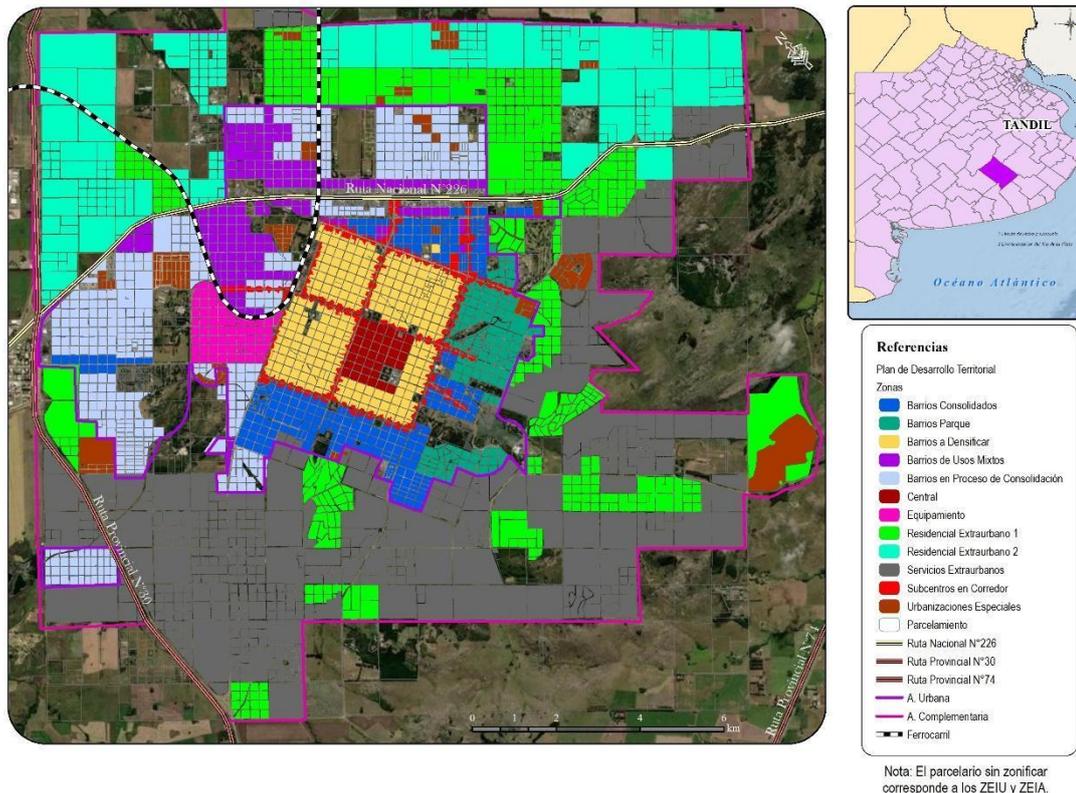
Muchos geógrafos analizan la acepción de estos conceptos afirmando que la justicia ambiental requiere procesos y resultados equitativos e imparciales, es decir, implica garantizar la igualdad de oportunidades en la planificación y toma de decisiones, así como la imparcialidad en los efectos distributivos. Evaluar ambas facetas exige planteamientos distintos (análisis de los procesos de formulación de proyectos y evaluación de consecuencias).

Las variables que definen la evaluación de las externalidades quedan suscitadas por considerar el reparto de los beneficios y perjuicios entre el universo relevante (categorización socioespacial), estimar la naturaleza y extensión de los efectos reales o potenciales (haciendo énfasis en la dimensión espacial como en la temporal) y dirimir si el reparto de los efectos es equitativo y/o justo.

El mapa n°22 refleja la normativa del Plan de Desarrollo Territorial (PDT) de la ciudad de Tandil aprobado en el año 2005 y actualizado al año 2022. En él se discriminan cada uno de los usos de la zona urbana, complementaria y rural con sus indicadores urbanísticos y código de zonificación. La dinámica intraurbana, el crecimiento de áreas en desarrollo y consolidación y el proceso de expansión de la población son muy importantes a la hora de generar planes de acción, gestión y planificación de usos reglamentarios, permitidos, permitidos con restricciones o prohibidos según el código para mitigar las consecuencias de un evento hidrometeorológico.



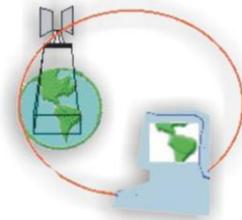
Mapa n°22. Código de zonificación según PDT 2005
Normativa actualizada 2022



Fuente: Elaboración personal en base a PDT²⁸

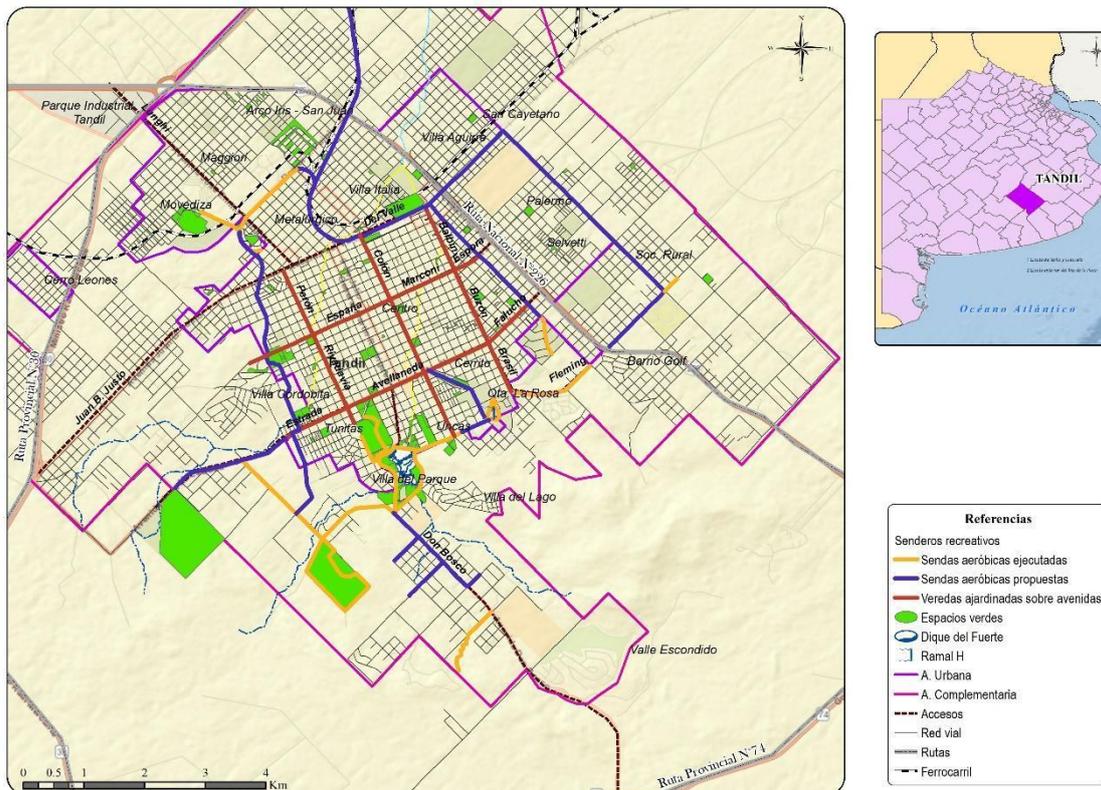
Según González et al., (2015) la normativa de ordenamiento urbano dispone el alcance de la reglamentación municipal en asuntos relacionados con el uso, la ocupación y la subdivisión del suelo; la provisión de infraestructura; las características de la construcción edilicia y el volumen del ejido urbano; la preservación de arquitectura histórica y ambientes de valor paisajísticos y el manejo ambiental y de reducción de riesgos. Respecto a estos dos últimos indicadores que mencionan los autores cabe destacar el valor adquirido por la distribución espacial de los espacios verdes, ya sea recreativos, superficies netamente verdes o pulmones de manzanas, como se observa en el mapa n°23. Los senderos recreativos y espacios verdes públicos visualizados en

²⁸ IDE TANDIL: <http://mapa.tandil.gov.ar>



la figura n°37 se comportan como superficies permeables para garantizar la infiltración, disminuir el tiempo de retención y favorecer el drenaje del agua lluvia hacia sus colectores más cercanos en períodos de precipitaciones intensas.

Mapa n°23. Espacios verdes y senderos recreativos de la ciudad de Tandil (año 2022)



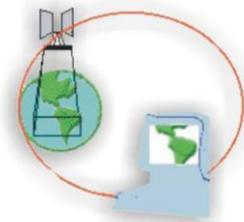
Fuente: elaboración personal. Dirección de espacios verdes públicos. Municipalidad de Tandil.



Figura n°37. Sendas aeróbicas, parques y espacios recreativos



Fuente: La Macchia. (2022) y Municipalidad de Tandil. (2021)

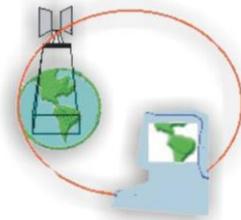


Si hacemos referencia a la provisión de infraestructura urbana, la calidad en la conexión de los equipamientos colectivos y las características de los materiales en la construcción edilicia la urbanización, el crecimiento urbano y los procesos de expansión hacia los ejes de desarrollo generan costos que derivan de la construcción de planes de viviendas y desarrollos urbanísticos para garantizar la accesibilidad, la integración, conexión y movilidad de la dinámica intraurbana y la configuración del espacio urbano. En este apartado no se contempla la infraestructura de la red pluvial, ya que merecía un análisis individual desde el estudio de la cuenca urbana y su red drenaje.

Las políticas públicas que buscan disminuir la brecha centro-periferia y los costos sociales, económicos y ambientales de las zonas de exclusión y/o de vulnerabilidad socioterritorial, según se observó en el mapa n°2, requieren pensar en criterios de sostenibilidad, equidad y justicia espacial. Este último concepto junto al de justicia ambiental constituyen una herramienta conceptual de obligada incorporación en los procesos de diagnóstico de situación y formulación de políticas y proyectos geo-ambientales, por lo cual, el balance entre impactos positivos y negativos repartidos en el espacio en pos de lograr una mayor equidad o justicia social, adquiere un carácter preponderante para la intervención de grupos activistas, asambleas y organizaciones no gubernamentales.

En última instancia los procesos y factores que derivan del crecimiento urbano, la extensión de las redes de equipamientos de servicios, la especulación del mercado inmobiliario y la construcción de planes de vivienda pueden modificar algunas de las herramientas normativas del PDT de la ciudad (mapa n°19) ampliando usos, creando nuevos ejes de desarrollo, modificando indicadores y otorgando excepciones para que determinados actores y agentes sociales puedan estar habilitados desde la norma. El resultado es configurar un espacio productivista y dinámico que deja expuesto los procesos especulativos de loteos en zonas no permitidas para la urbanización residencial o comercial y, por consiguiente, la vulnerabilidad del sistema natural, hidrológico y ambiental perjudicando su uso sustentable y ampliando la injusticia ambiental.

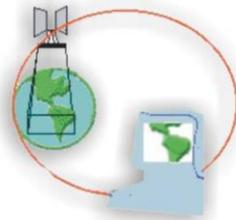
En esta línea se seleccionaron algunos indicadores de segregación socioespacial que intervienen en la detección de zonas de peligro y vulnerabilidad para el análisis de áreas inundables y anegadas. El área de cobertura, tipo de conexión y ampliación de la infraestructura urbana de equipamientos colectivos y la calidad



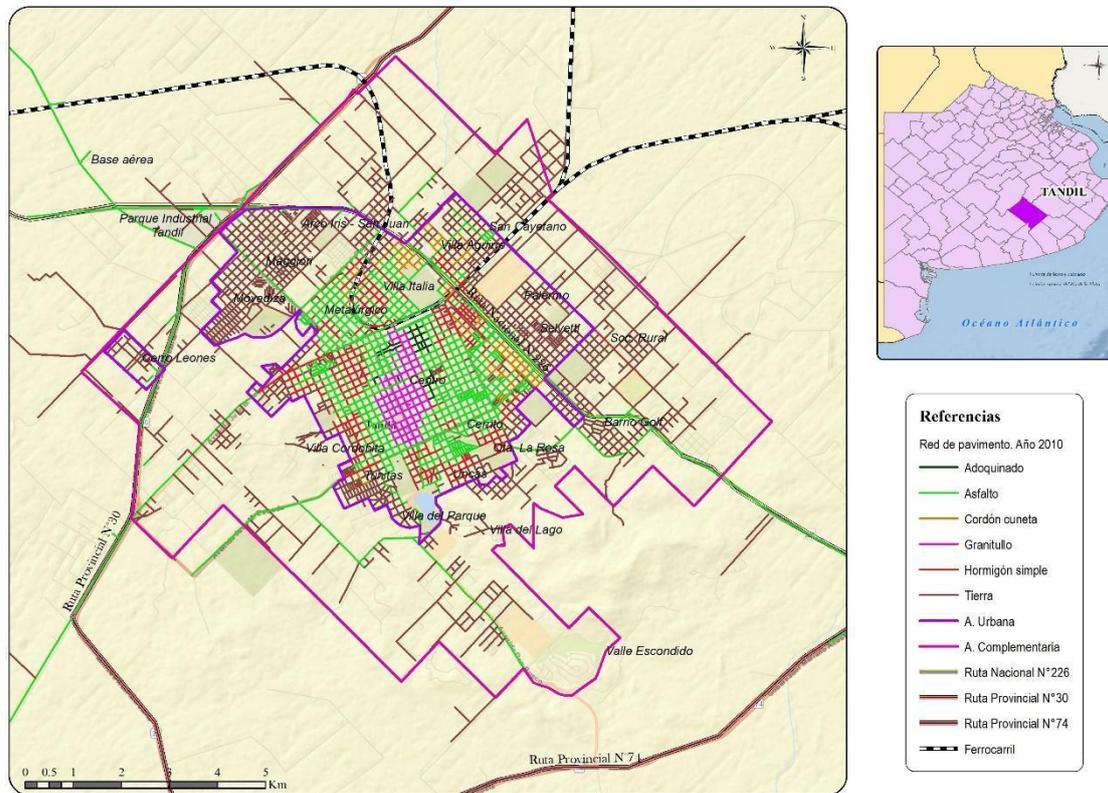
constructiva de la vivienda constituyen algunos de ellos que determinan la vulnerabilidad de las zonas en crecimiento y expansión. La consolidación de las áreas de expansión, principalmente hacia el N, NO y NE y los intereses de actores privados derivados de la especulación inmobiliaria hacia el SE reflejan la ampliación de las redes de equipamientos hacia esos espacios y la posibilidad de garantizar la conexión y accesibilidad de la población local mediante las políticas de acceso a la vivienda.

Sin embargo, indirectamente manifiesta los impactos en la topografía y paisaje natural. Por un lado disminuyendo superficies permeables, áreas verdes y como consecuencia la infiltración por el acelerado ritmo de la construcción y el asfaltado de accesos viales primarios y secundarios, y por otro, desviando cauces y aumentando los caudales en el proceso de escorrentía desde aguas arriba hacia aguas abajo de la cuenca urbana. Por ello, el crecimiento de superficies de infiltración y medidas estructurales que impacten en el almacenamiento como el mantenimiento, mejoramiento y extensión del sistema de alcantarillado pluvial con cordones y cunetas permiten colectar el agua y drenarla de manera ordenada dentro de la red hacia el cauce del arroyo, por lo cual, se reduce el tiempo de concentración, disminuye su velocidad y evita problemas de escurrimiento y drenaje. El mapa n°24 refleja la red de pavimento del año 2010 dentro del área urbana y complementaria de la ciudad. A grandes rasgos y a pesar de la desactualización de la cartografía disponible, se observa que actualmente el área urbana se encuentra asfaltada en un 80% aproximadamente, conviviendo con áreas de expansión de cordón cuneta hacia los ejes de crecimiento N, NO, NE y S. Ello permite establecer asociaciones con el proceso de expansión de la ciudad y la modernización de ciertas áreas especulativas.

La pavimentación de accesos principales y calles internas de algunos barrios y el mejoramiento de las áreas servidas por el desarrollo de infraestructura no evidencian problemas de drenaje e incluso las medidas estructurales ejecutadas durante los inicios de la configuración socioespacial de la ciudad dieron resultados satisfactorios, pero sí trasladan el conflicto hacia otras zonas de baja pendiente en proceso de consolidación o de reciente densificación y/o urbanización. Asimismo existen zonas que sufren las consecuencias de la recurrencia de lluvias desde siempre y se intensifican por la densificación del área, el aumento de construcción y pavimentación y la impermeabilidad del suelo.



Mapa n°24. Red de pavimento de la ciudad de Tandil (año 2010)



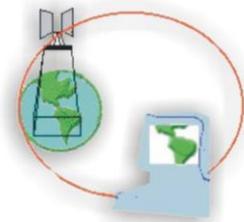
Fuente: elaboración personal en base a planos de CAD²⁹ de la Municipalidad de Tandil

La extensión de las redes muestra una correlación directa con el crecimiento de la ciudad, el aumento de la superficie construida, la dinámica de actividades productivas y comerciales y la generación de nuevos espacios recreativos que funcionan como amortiguadores del escurrimiento. Este análisis puede ser complementado con los resultados del análisis de indicadores en hogares y viviendas provenientes del Censo Nacional de Población, hogares y viviendas (INDEC, 2010).

El procesamiento de información mediante la integración de variables desagregadas teniendo en cuenta la provisión de servicios³⁰, la calidad de su conexión y el material constructivo conforman indicadores globales que refieren al hogar y la

²⁹ Computer Aided Design (CAD)

³⁰ Para complementar el aporte cartográfico puede consultarse la plataforma abierta de datos espaciales de población de la Argentina: Poblaciones. Disponible en: <https://mapa.poblaciones.org>



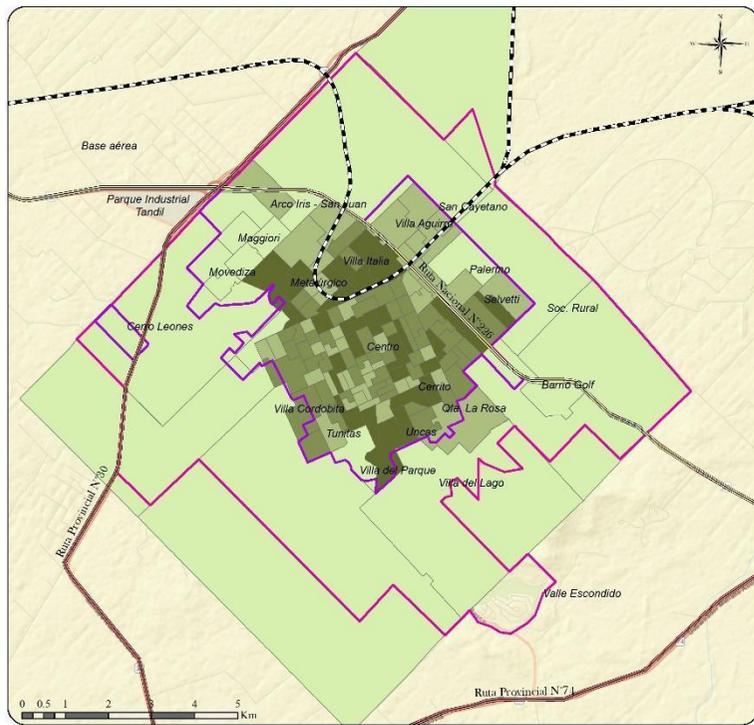
vivienda y permiten un estudio de las condiciones de vulnerabilidad para cada uno de los radios censales urbanos que comprenden la zona urbana y complementaria.

Si bien la información disponible varía entre la provista por el mapeo desde municipio (2010), la procesada a escala de radios y segmentos urbanos por el censo del INDEC y el análisis que podemos realizar en la actualidad, en términos de comparabilidad, pueden ser asociados los patrones de distribución y comportamiento socioespacial de las variables analizadas y permiten explicar los impactos que generan los eventos recurrentes tanto en el área central como en la periferia.

El indicador que integra la provisión de servicios representa la calidad de las conexiones según se muestra en el mapa n°25 que pueden categorizarse en satisfactoria, básica e insuficiente. La primera refiere a las viviendas que disponen de agua a red pública y desagüe cloacal, mientras que la segunda describe la situación de aquellas viviendas que disponen de agua de red pública y el desagüe a pozo con cámara séptica. Finalmente la última categoría engloba a las viviendas que no cumplen ninguna de las dos condiciones anteriores.

El mapeo cartográfico de cada situación describe una mejor calidad de las conexiones en todos los radios urbanos del centro de la ciudad, situaciones intermedias a medida que nos alejamos de las cuatro avenidas y vías de acceso principal, y hacia los ejes de crecimiento y expansión, y las peores situaciones vinculadas a la cobertura, accesibilidad y disponibilidad de infraestructura en general se ubican hacia los radios del área complementaria y la periferia suburbana.

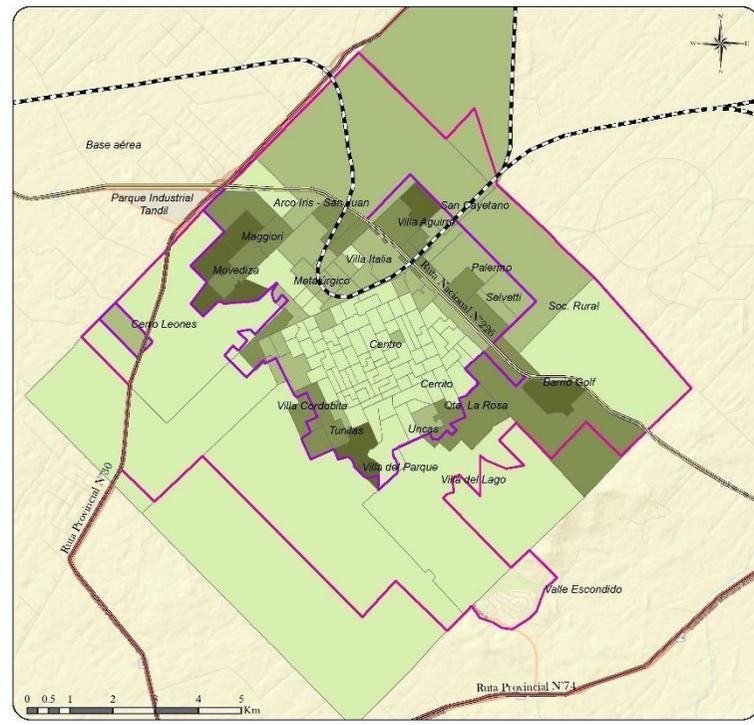
Mapa n°25. Calidad de las conexiones a los servicios básicos



Referencias

Conexión a servicios satisfactoria

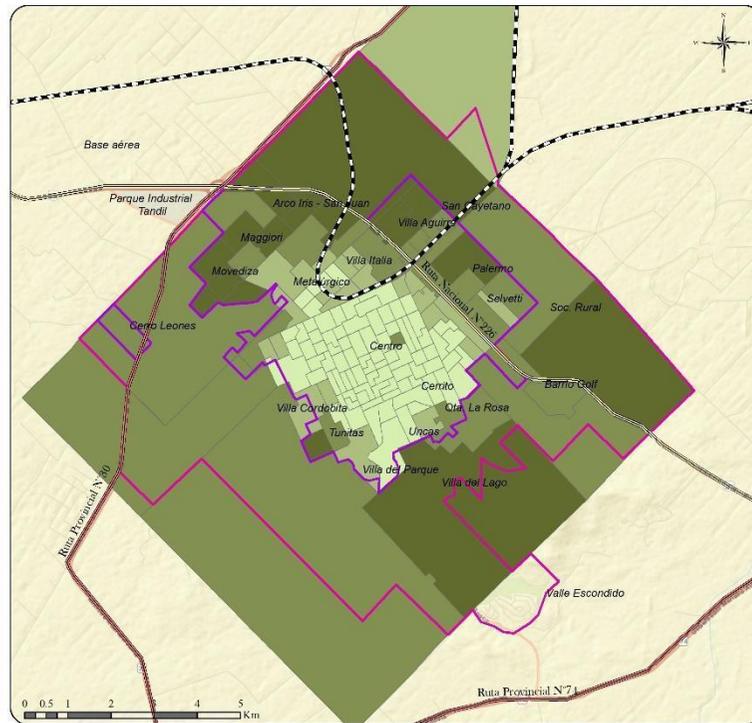
- 0 - 82
- 83 - 206
- 207 - 282
- 293 - 429
- A. Urbana
- A. Complementaria
- Ruta Nacional N°226
- Ruta Provincial N°30
- Ruta Provincial N°74
- Ferrocarril



Referencias

Conexión a servicios básica

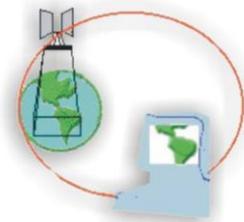
- 0 - 14
- 15 - 41
- 42 - 82
- 83 - 138
- A. Urbana
- A. Complementaria
- Ruta Nacional N°226
- Ruta Provincial N°30
- Ruta Provincial N°74
- Ferrocarril



Referencias

Conexión a servicios insuficiente

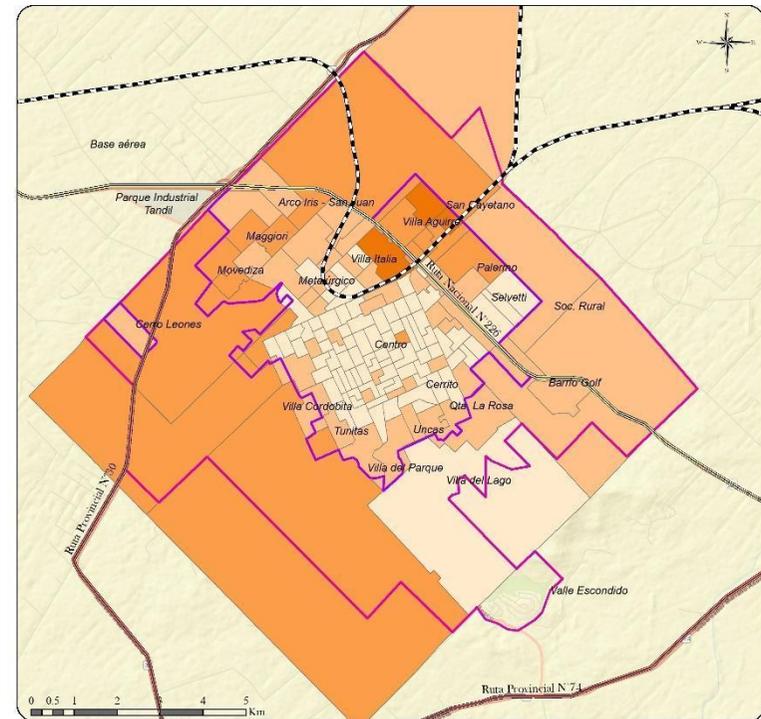
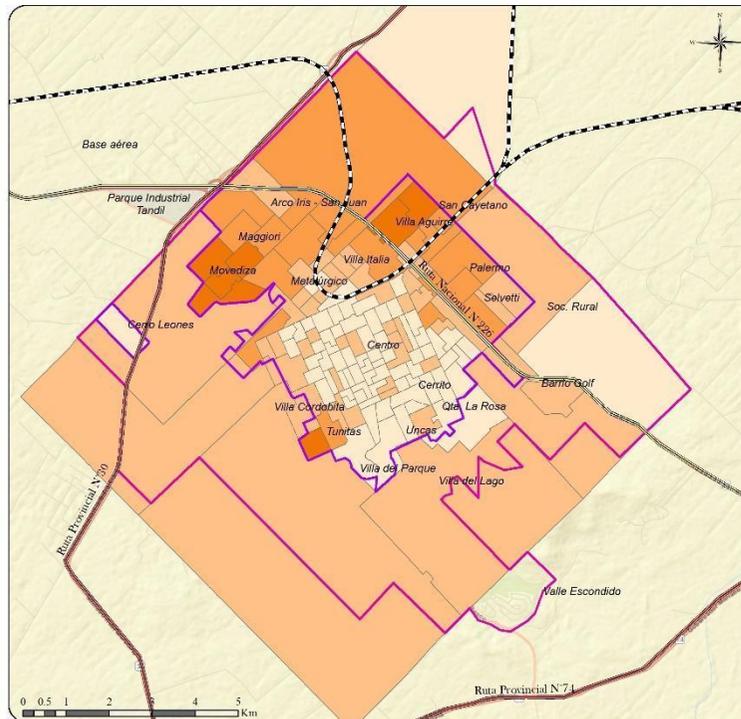
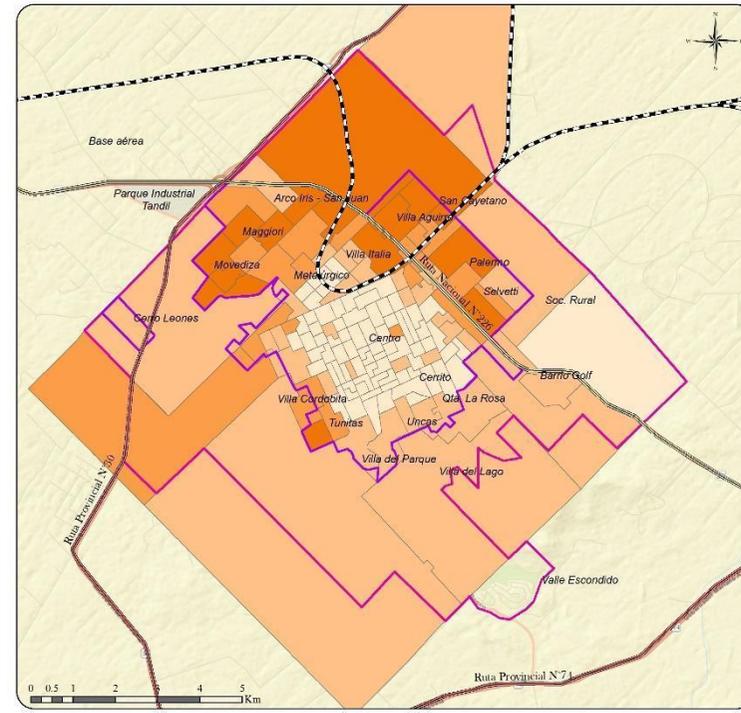
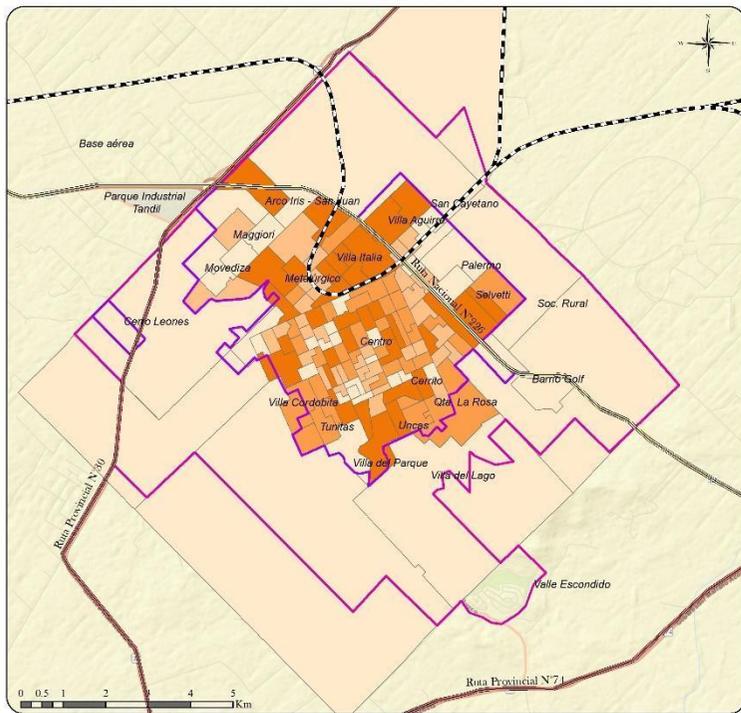
- 0 - 17
- 18 - 52
- 53 - 137
- 138 - 231
- A. Urbana
- A. Complementaria
- Ruta Nacional N°226
- Ruta Provincial N°30
- Ruta Provincial N°74
- Ferrocarril

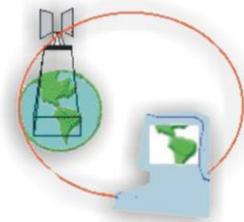


Fuente: elaboración personal en base al Censo Nacional de Población, hogares y viviendas (INDEC, 2010)

Por último y para concluir el indicador que integra el tipo de material constructivo de las edificaciones y que puede desagregarse en variables referidas al hogar está determinado por dos dimensiones. Por un lado, la calidad de los materiales que se presenta en el mapa n°26 se divide en cuatro clases (CALMAT I a IV). La primera clase CALMAT I caracteriza las viviendas que presentan materiales resistentes en todos los componentes e incorpora todos los elementos de aislación y terminación. La segunda clase CALMAT II determina las viviendas con materiales resistentes en todos los componentes, pero carecen de elementos de aislación o terminación. La tercera categoría CALMAT III identifica las viviendas con materiales resistentes en todos los componentes, pero le faltan elementos de aislación o terminación en todos sus componentes, presenta techos de chapa de metal o fibrocemento u otros sin cielorraso, o paredes de chapa de metal o fibrocemento. La última clase CALMAT IV describe las viviendas que presentan materiales no resistentes al menos en uno de los componentes, pero no en todos.

Mapa n°26. Calidad de los materiales de las viviendas

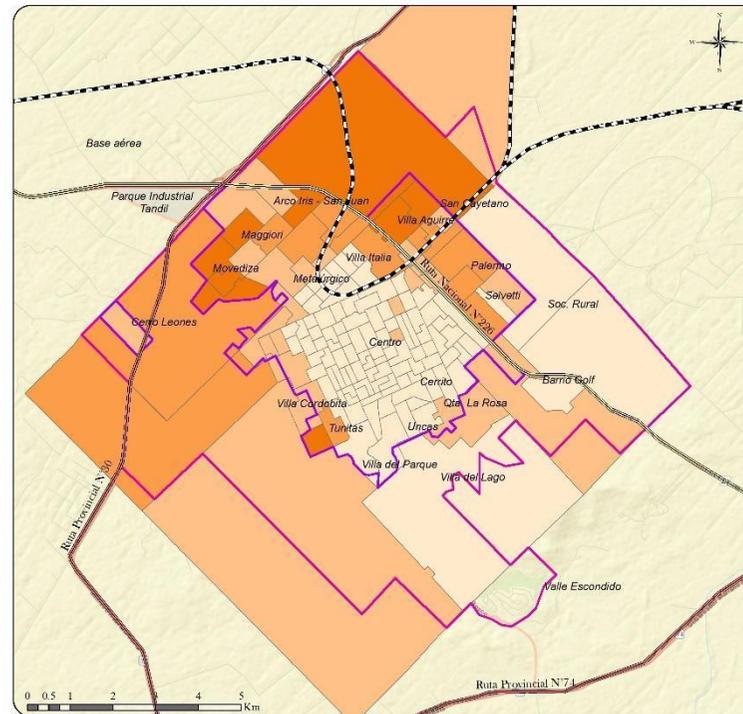
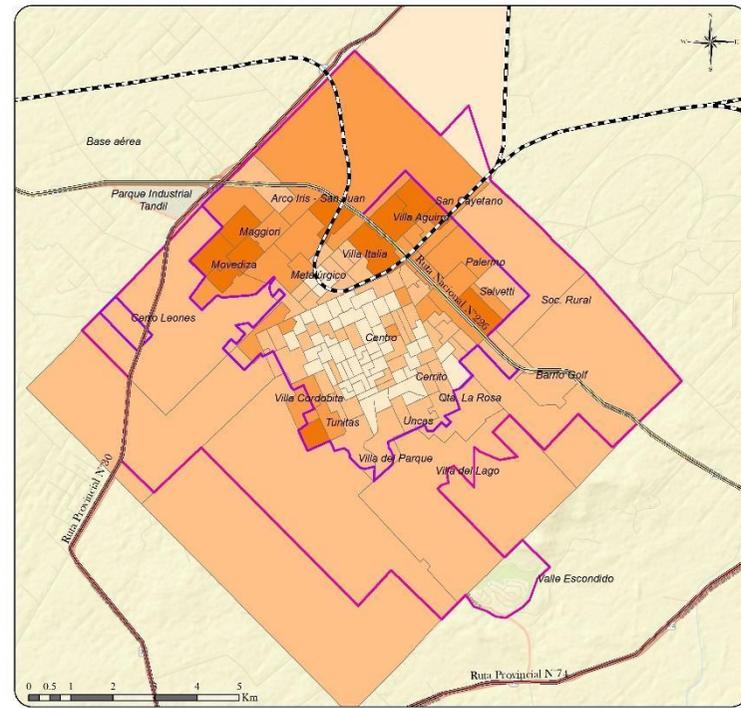
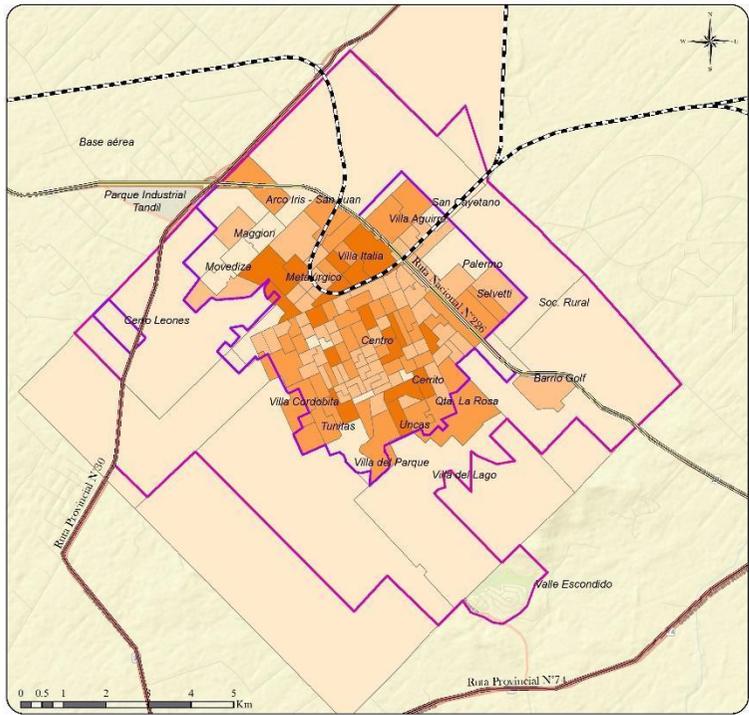




Fuente: elaboración personal en base al Censo Nacional de Población, hogares y viviendas (INDEC, 2010)

Por otro lado, la segunda dimensión incorporada en el mapa n°27 refiere al tipo de calidad constructiva de la vivienda desagregada en satisfactoria, básica e insuficiente. Este indicador se construye a partir de la calidad de los materiales con los que está construida la vivienda y las instalaciones internas a servicios básicos (agua de red y desagüe) de las que dispone. La calidad satisfactoria involucra a las viviendas que disponen de materiales resistentes, sólidos y con la aislación adecuada. A su vez también disponen de cañerías dentro de la vivienda y de inodoro con descarga de agua. La calidad básica comprende las viviendas que no cuentan con elementos adecuados de aislación o tienen techo de chapa o fibrocemento. Al igual que el anterior, cuentan con cañerías dentro de la vivienda y de inodoro con descarga de agua. Finalmente la calidad insuficiente engloba a las viviendas que no cumplen ninguna de las dos condiciones anteriores.

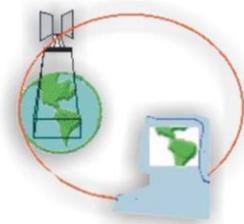
Mapa n°27. Calidad constructiva de las viviendas





Fuente: elaboración personal en base al Censo Nacional de Población, hogares y viviendas
(INDEC, 2010)

La mejor y peor situación de calidad de las conexiones a los servicios básicos induce a pensar que los hogares cuentan con una determinada calidad en los materiales constructivos de sus viviendas. Es decir, a mejor calidad de conexión de infraestructura, las viviendas reflejan mejor calidad constructiva y a peor calidad en la conexión a los servicios, las viviendas presentan mayores carencias en su edificación.

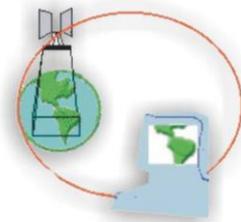


5. Modelización hidrodinámica, peligro y vulnerabilidad en la cuenca urbana de la ciudad de Tandil

El último capítulo de esta investigación presenta los resultados arrojados de la simulación de los escenarios planteados para 1996 y 2011. En RasMapper (*HEC-RAS*) se obtuvieron los mapas de profundidad (*depth*) y velocidad máxima (*velocity*), los perfiles para cada intervalo de tiempo modelizado (*unsteady profile*), la simulación hidrodinámica en tiempo real, los límites de extensión del área inundada (*inundation boundary*) y el producto de las variables de profundidad y velocidad (*depth x velocity*).

La etapa de postprocesamiento se llevó a cabo en el programa ArcGIS 10.2 donde se elaboró la cartografía temática de los escenarios y se evaluó el modelo teniendo en cuenta los intervalos de clase para cada una de las variables y su análisis de correlación/asociación con las dimensiones y variables explicativas del esquema analítico. Por un lado, las variables físicas como la topografía y la pendiente haciendo énfasis en el drenaje urbano y las variables urbanas, como la evolución de la superficie edificada (densidades urbanas), la distribución de espacios verdes y la red de infraestructura pluvial y pavimento para explicarlos como procesos y factores de riesgo en la detección de zonas anegadas y potencialmente inundables.

Finalmente se presenta un mapa sintético de la clasificación del peligro y vulnerabilidad para el año 2011 readaptando a nuestra área de estudio la escala técnica de peligro propuesta por la guía AEMI (2013). La interpretación y análisis de resultados se conjugó con algunos indicadores de vulnerabilidad como la infraestructura urbana de equipamientos colectivos. Los impactos de los cambios en densidades urbanas y área de afectación de las viviendas según la calidad de conexión a los servicios, la calidad constructiva de las viviendas y la calidad de sus materiales permite reflexionar sobre el tipo de medidas de manejo y control del peligro que se abordan en Bertoni (2019) y Tucci (2007) en el contexto de una revisión de la planificación y zonificación de usos de suelo del plan de ordenamiento territorial actual.

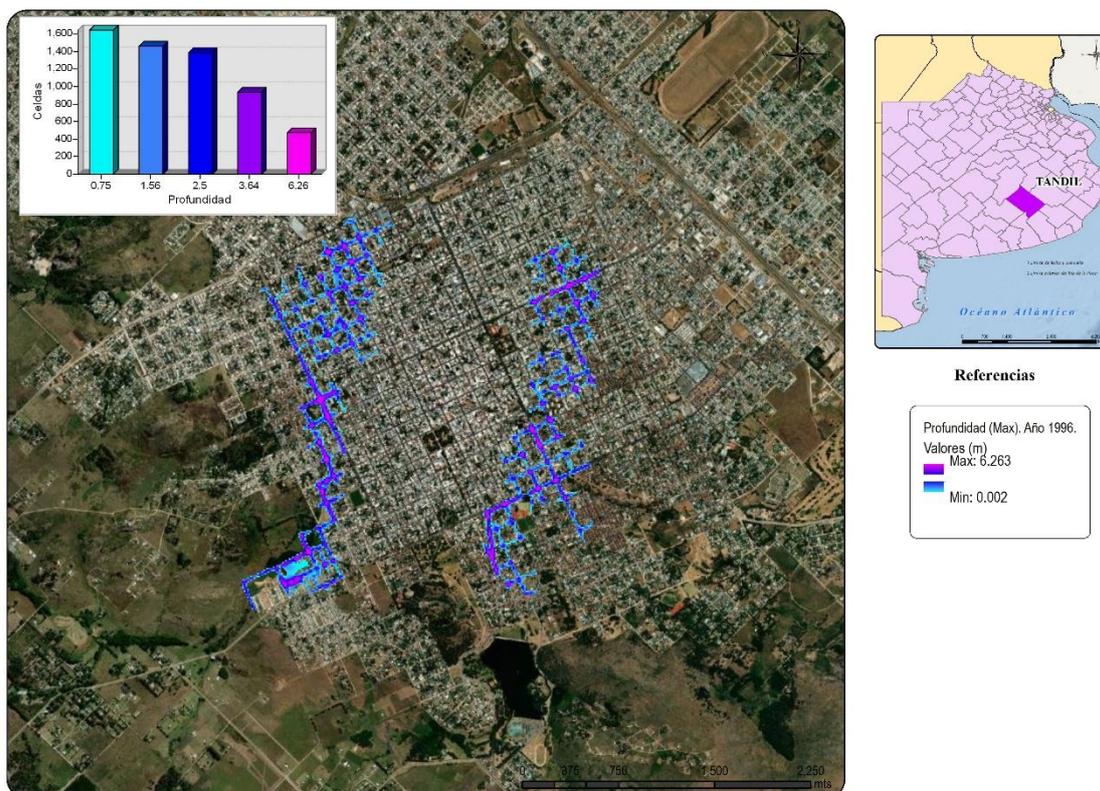


5.1 Desarrollo y evaluación del modelo hidrológico: Simulación de escenarios de profundidad y velocidad de flujo de escurrimiento 1996 y 2011

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. Como se observa en cada una de las salidas cartográficas se elaboró gráficos que representan la distribución de los pixeles para cada clase.

El mapa n°28 refleja el escenario de profundidad para 1996 y el mapa n°29 para 2011. El rango global de valores de profundidad del agua no varía demasiado durante el período alcanzando un umbral de 6,26 en 1996 y disminuyendo a 5,95 en 2011. Sin embargo, los gráficos que acompañan permiten analizar el comportamiento de los pixeles “inundados” en cada momento.

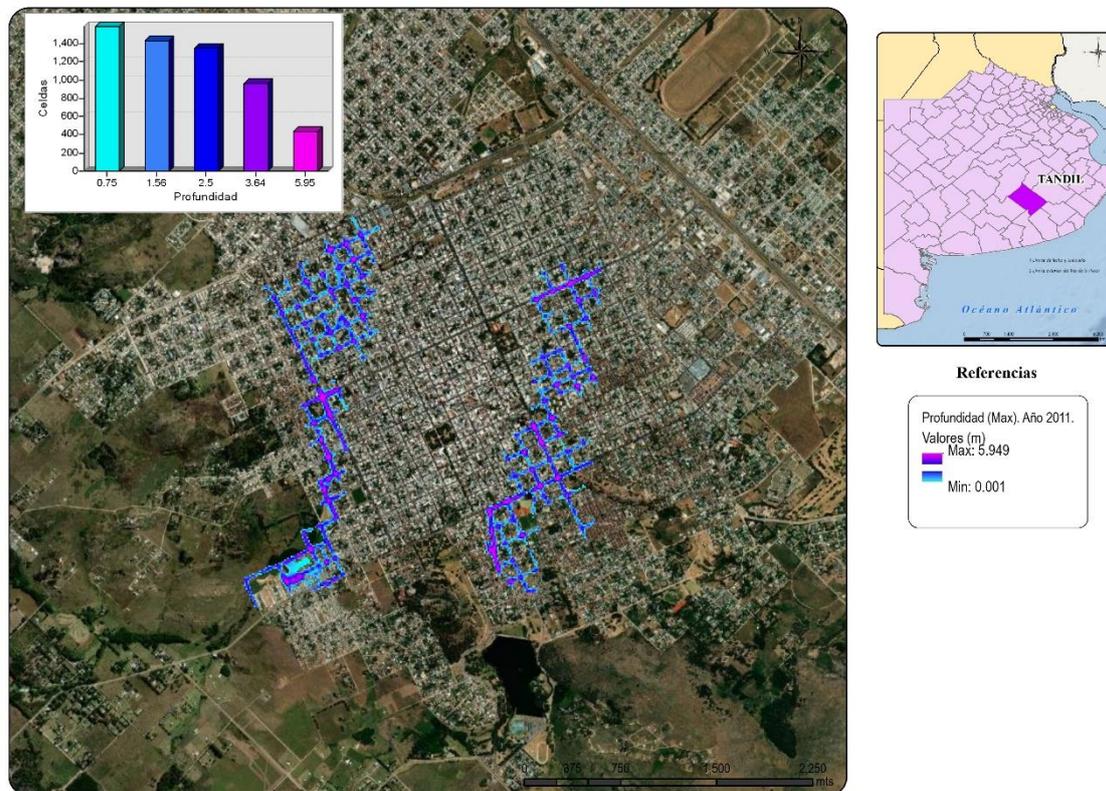
Mapa n°28. Escenario profundidad simulada 1996



Fuente: elaboración personal. ArcGIS 10.2



Mapa n°29. Escenario profundidad simulada 2011



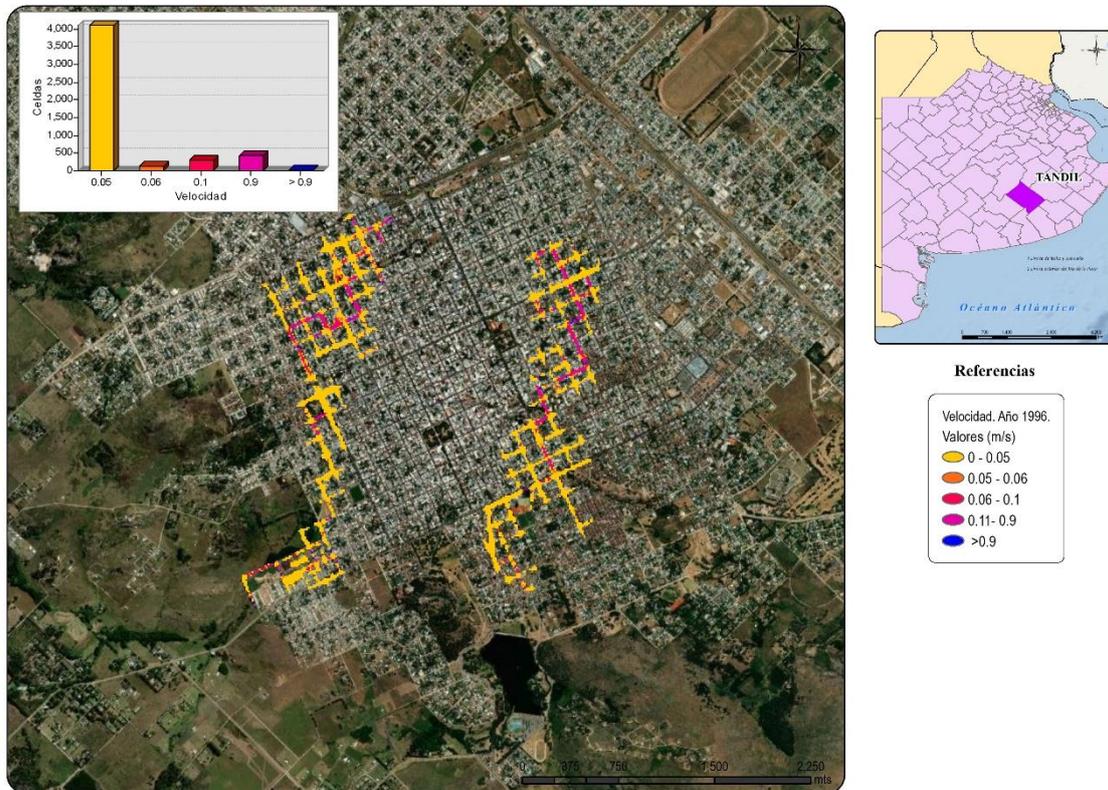
Fuente: elaboración personal. ArcGIS 10.2

Para el primer momento considerado existe una graduación en la concentración del número de píxeles para cada clase. Mientras que para el año 2011 se observa una reducción del número de píxeles que reflejan el límite del área inundada y una mayor representatividad en la clase 4 (3,64 m). Esto ocurre por el aumento del tiempo de retención del agua en determinadas zonas en dirección del sentido del escurrimiento y la explicación de algunos indicadores urbanos que abordaremos más adelante.

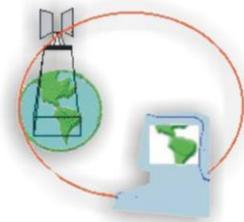
El mapa n°30 y el mapa n°31 muestran los mapeos de velocidad para los dos períodos comprendidos.



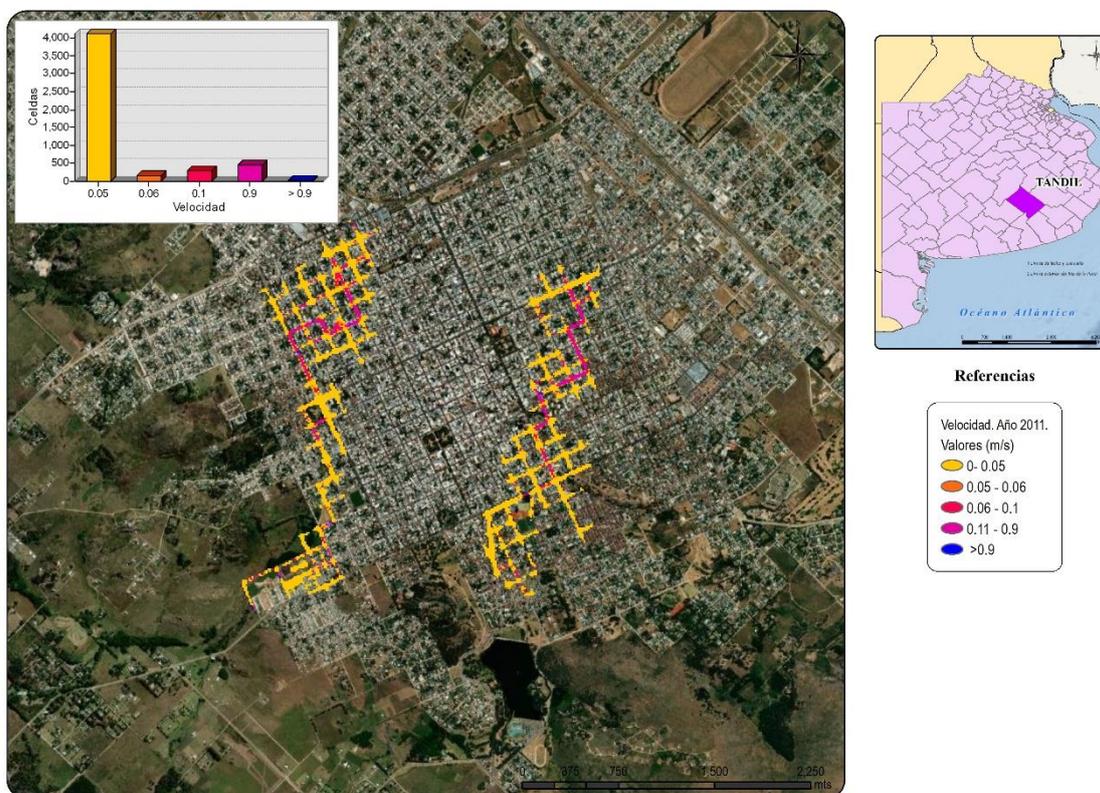
Mapa n°30. Escenario velocidad simulada 1996



Fuente: elaboración personal. ArcGIS 10.2



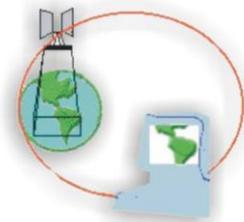
Mapa n°31. Escenario velocidad simulada 2011



Fuente: elaboración personal. ArcGIS 10.2

En este caso la mayoría de los valores de velocidad para ambos momentos se ubican en el primer intervalo de 0,05 m/s. Para el año 2011 se observa un incremento de celdas en el rango de 0,06 m/s y en las del cuarto rango de 0,9 m/s. Es necesario destacar que esta escala de intervalos utilizada intenta interpretar como el escurrimiento se acelera o sufre restricciones según la intensidad y duración del evento analizado. 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 suma el conjunto de mapas de profundidad y velocidad permiten arribar a varias conclusiones. La primera es la variación de la extensión del límite del área inundada. Para el primer momento se evidencia un mayor alcance respecto a la intensidad del evento, mientras que para el año 2011 existe un mayor tiempo de retención de agua en determinadas zonas principalmente en el sentido de la dirección



de la pendiente y la red de drenaje, por lo que el límite del área de afectación disminuye. Los factores que permiten explicar esta variación del área inundada para los dos años es el impacto que genera el crecimiento de la superficie construida en detrimento de las superficies verdes como amortiguadores del proceso de escorrentía. La impermeabilidad del suelo aumenta el tiempo de permanencia del agua retenida que no permite que escurra de manera fluida. La presencia de espacios verdes es muy pobre y se encuentran distribuidos de manera muy desigual dentro del área simulada por lo que no permiten favorecer la permeabilidad de los suelos, sino que al incrementarse la superficie edificada en los ejes de crecimiento urbano, la red de pavimento y contemplar algunas variables como la intensificación de residuos sólidos domiciliarios contribuyen a que las áreas de peligro sean representativas dentro de los escenarios.

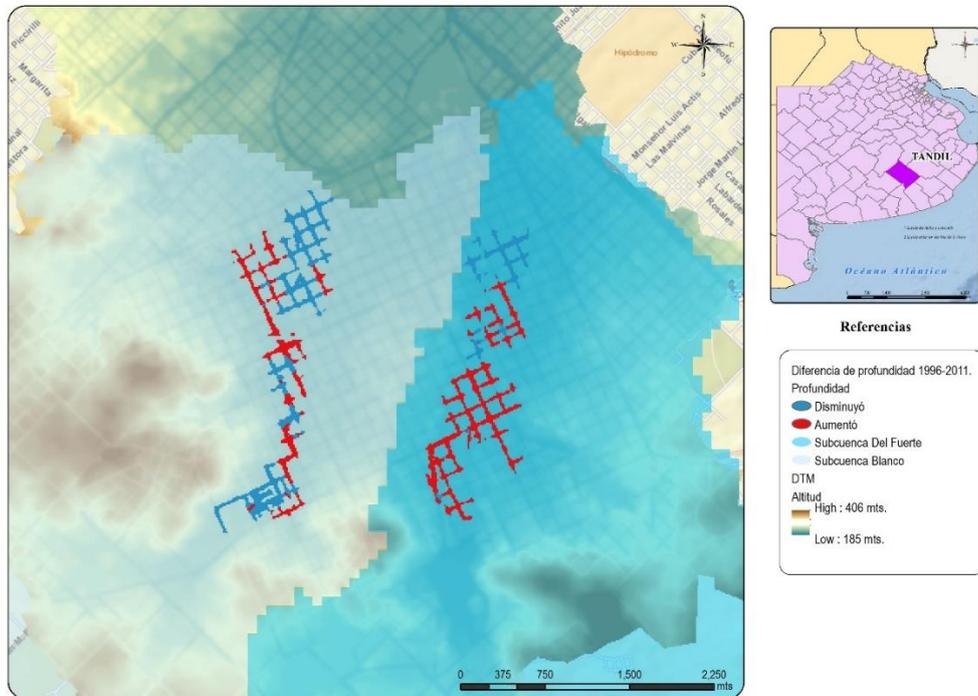
La segunda es analizar las características físicas del lugar como la topografía y la pendiente que reciben los impactos de los procesos urbanos en la dinámica del escurrimiento generando consecuencias aguas abajo de las subcuencas. La evolución de la expansión urbana para los períodos 1991-2002 y 2011 ha sido significativa a partir del año 2002 extendiéndose hacia ejes de crecimiento espontáneo, planificado al N, NO y NE y algunos inducidos hacia el faldeo serrano como zonas de especulación inmobiliaria con conflictividad de usos. La densidad de habitantes por radio censal dentro del área inundada se ubica entre 4255 a 8837 habitantes para el 2010, por lo que involucra densidades medias altas y altas, mientras que el número de viviendas por km² comprende entre 2055 y 5600.

La tercera es comprender la función del drenaje que adquiere los conductos y ramales pluviales para la subcuenca del arroyo Blanco y la del arroyo del Fuerte y destacar el aporte de las dos obras estructurales existentes en la segunda. Sin duda la magnitud de los anegamientos disminuiría, pero en ese caso, consideraríamos otra escala de impactos que derivan de su estado, mantenimiento y mejora sin analizar la contribución de los desagües pluviales domiciliarios a la red de drenaje.

Finalmente el mapa n°32 y el mapa n°33 analizan la distribución espacial de las diferencias entre ambos momentos para lograr una visión integrada de aquellas celdas que han arrojado variación positiva y negativa con respecto a la profundidad del agua acumulada entre las simulaciones 1996 - 2011.

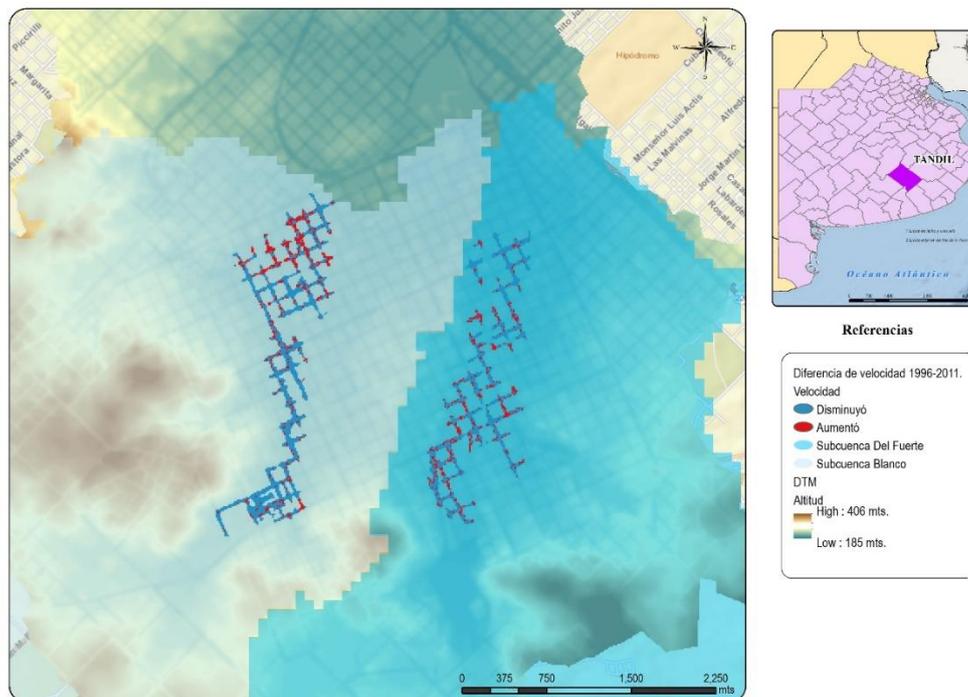


Mapa n°32. Diferencias profundidad simulada 1996-2011

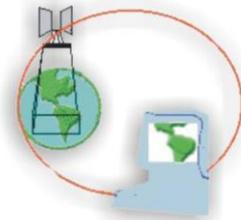


Fuente: elaboración personal. ArcGIS 10.2

Mapa n°33. Diferencias velocidad simulada 1996-2011



Fuente: elaboración personal. ArcGIS 10.2



Claramente los mapas arrojan como resultado el aumento de los períodos de concentración de agua en el tiempo que transcurre el evento afectando al escurrimiento superficial. Las diferencias en los valores de profundidad máxima para el área simulada aumentaron aproximadamente un 54% para 1996 - 2011. Para la obtención de este valor porcentual deben hacerse algunas salvedades. Más allá de que los valores distorsionan el resultado final para el área de interés deben ser ajustados pensando en las dos obras de ingeniería que regulan la configuración de la ciudad y la consideración de la subcuenca del Arroyo Blanco y del Fuerte, por lo que las áreas afectadas serían menores y tendríamos una mirada integral del sistema. Resulta interesante poder dilucidar el rol asignado a la red pluvial siendo que su función en drenar el agua por sus conductos y ramales disminuiría los impactos frente a la intensidad de los eventos. De la misma manera si hubiésemos considerado una variabilidad diferente en la intensidad de lluvia o duración del evento para cada subcuenca. Por último la construcción de la malla es otra variable que influye en los resultados obtenidos, ya que el modelo ejecuta los cálculos dentro del área de mallado que asignemos dentro del programa. Sin embargo se afirma que la expansión del área urbana edificada, por un lado, hacia zonas de mayor pendiente y una diversa dinámica de cobertura de usos y, por otro, la intensificación del crecimiento del casco urbano a nivel horizontal y vertical; y la falta de vegetación o espacios verdes que permite infiltrar el agua de lluvia incrementan la profundidad del agua retenida. Por lo tanto, aproximadamente un 75% de las celdas disminuyeron su velocidad (m/s) producto de la impermeabilización de los suelos que genera el aumento de la superficie edificada. Si observamos detenidamente algunos sectores de los mapas de diferencias 1996 - 2011 la suma de los pixeles que incrementaron mayormente su profundidad conectan las principales vías de acceso mientras que el aumento de las velocidades se ubica en las intersecciones de manzanas y la red vial. Podríamos preguntarnos qué sucedería con el desarrollo de mejoras en el entramado de la red pluvial y el incremento de superficies verdes para favorecer la infiltración sumada a otras estrategias de gestión y prevención como la regulación de indicadores urbanísticos.



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

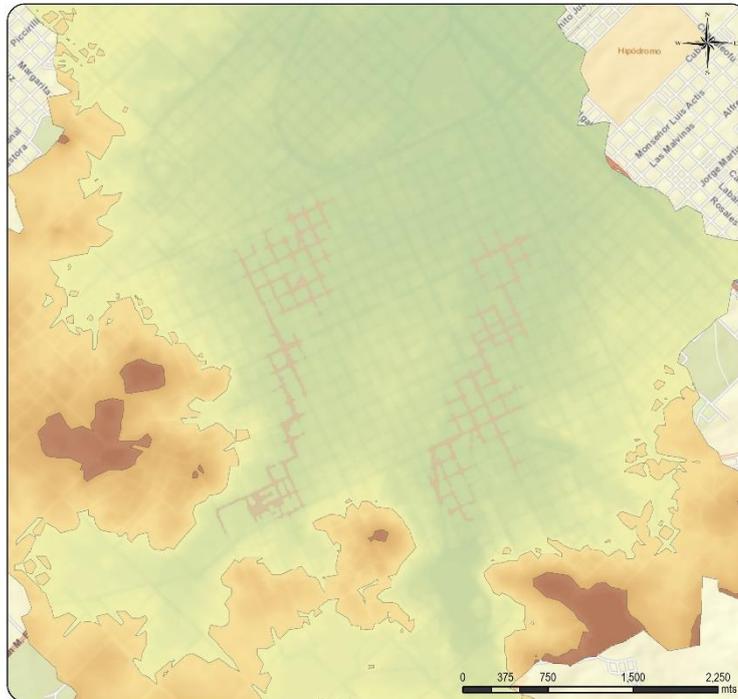
En este apartado se intentó integrar un análisis que mida el grado de correlación y/o asociación entre cada par de variables que definieron el modelo de datos de esta tesis. Teniendo en cuenta que la superficie inundada del área de mallado es de 633.331 m², es decir, unas 63.3 ha aproximadamente, se elaboraron 6 mapas de intersección por cada una de las variables que integran los factores de riesgo y sus dimensiones.

El mapa n°34 está definido por la representación cartográfica del área inundada vinculando 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 raster 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 5 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 4 clases: sin edificaciones, densidad baja, densidad media y densidad alta; para la variable espacios verdes se construyeron 3 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 5 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).

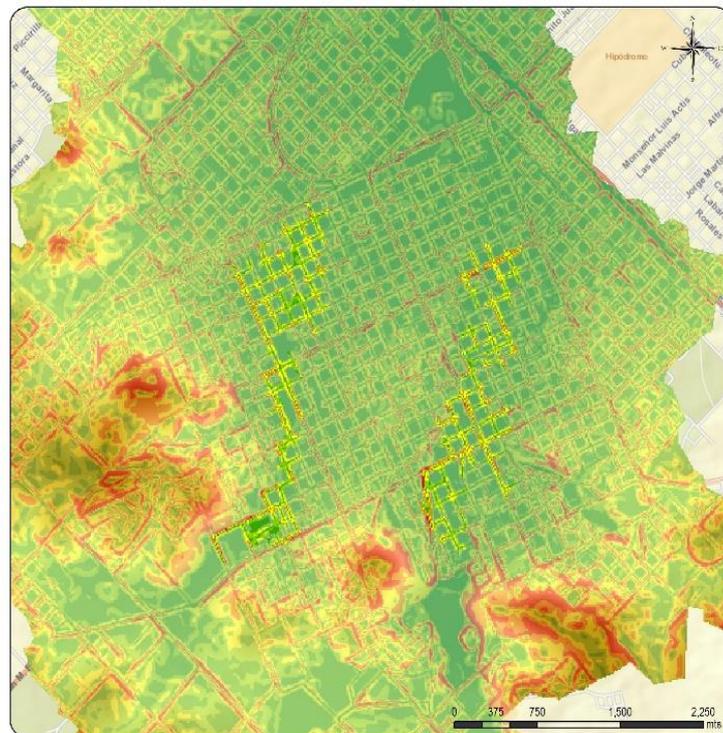


Mapa n°34. Dimensiones de análisis para la interpretación del riesgo de anegamiento



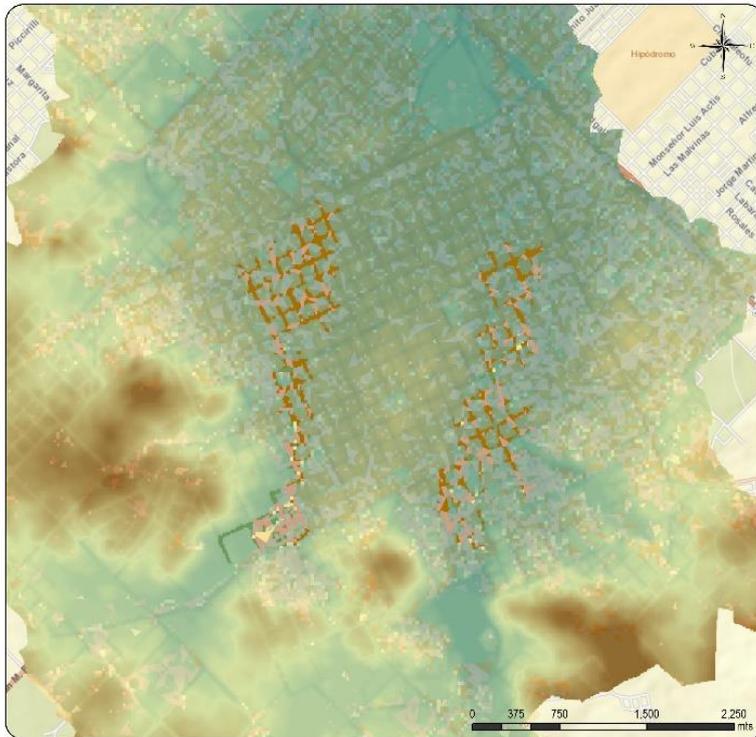
Referencias

- Topografía (m.)
- 250 m
- 185 m
- 250 m
- 300 m
- 350 m
- 406 m
- DTM
- Altitud
- High : 406 mts.
- Low : 185 mts.



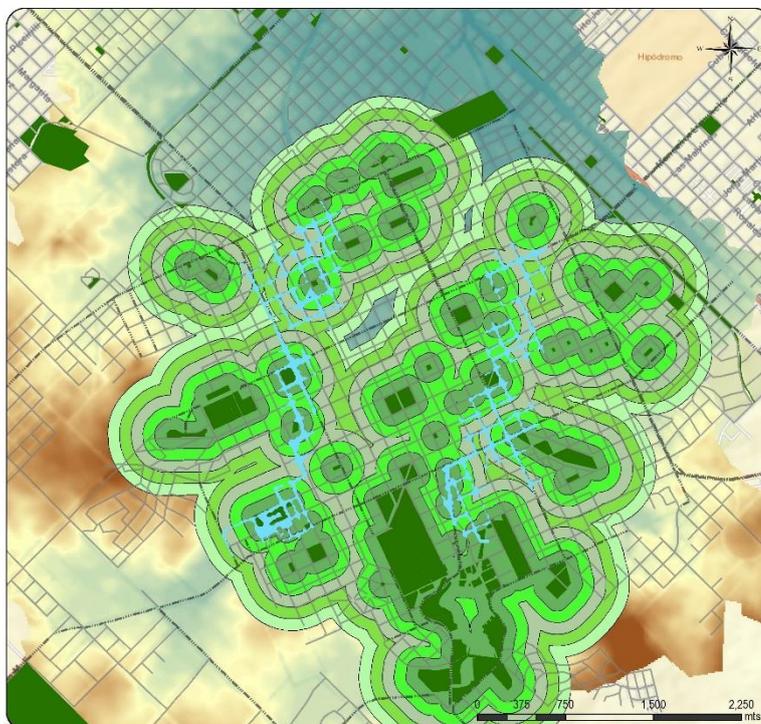
Referencias

- Intersección área inundada
- Pendiente (%)
- 0 - 5.82 %
- 5.83- 11.6 %
- 11.7 - 17.9 %
- 18 - 26.4 %
- 26.5- 61.8 %
- Pendiente (%)
- 0 - 5.82 %
- 5.83- 11.6 %
- 11.7 - 18.2 %
- 18.3- 26.7 %
- 26.8 - 61.8 %
- DTM
- Altitud
- High : 406 mts.
- Low : 185 mts.



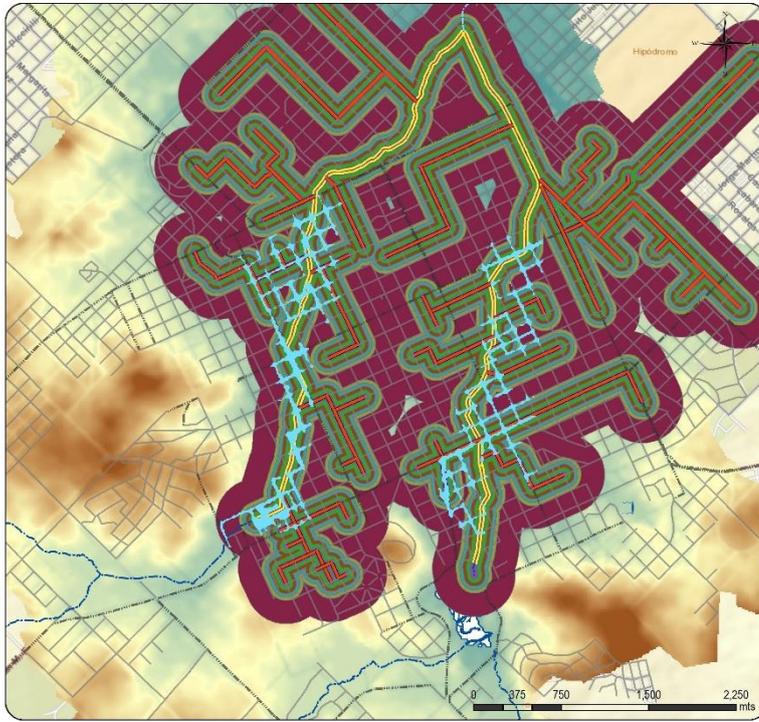
Referencias

- Intersección áreas inundada
- Densidades
 - Sin edificaciones
 - Densidad baja
 - Densidad media
 - Densidad alta
- Densidades urbanas
 - Sin edificaciones
 - Densidad baja
 - Densidad media
 - Densidad alta
- DTM
 - Altitud
 - High : 406 mts.
 - Low : 185 mts.

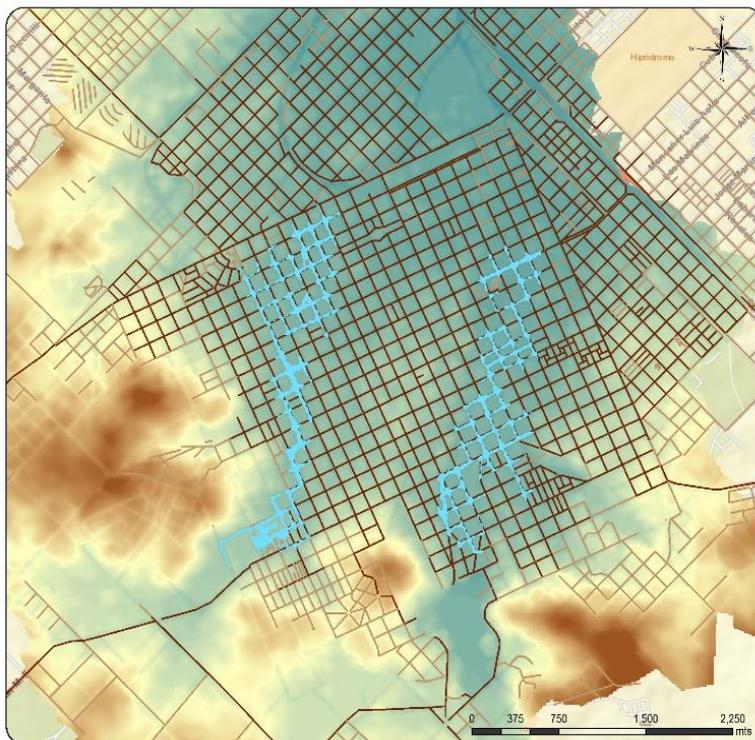


Referencias

- Buffers espacios verdes (m)
 - 100 m
 - 200 m
 - 300 m
 - 400 m
 - 500 m
- Limite área inundada
- Espacios verdes
- Avenidas
- Calles
- DTM
 - Altitud
 - High : 406 mts.
 - Low : 185 mts.



- Referencias**
- Buffers red pluvial (m.)
 - 30 m
 - 60 m
 - 90 m
 - 120 m
 - 150 m
 - >150 m
 - Límite área inundada
 - Cursos de Agua
 - A° Blanco (entubado)
 - A° Del Fuerte (entubado)
 - Ramales
 - A. Langueyú
 - Avenidas
 - Calles
 - Dique del Fuerte
 - Ramal H
 - DTM
 - Altitud
 - High : 406 mts.
 - Low : 185 mts.



- Referencias**
- Red de pavimento
 - Eje de calles pavimentadas
 - Eje de calles no pavimentadas
 - Límite área inundada
 - DTM
 - Altitud
 - High : 406 mts.
 - Low : 185 mts.

Fuente: elaboración personal. ArcGIS 10.2

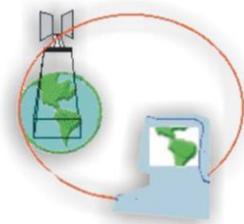


Tabla n°6. Asociación de variables físicas y urbanas en el área simulada 2011

Topografía		Sup./ha	Red de pluvial		Sup./ha
Área inundada		Sup./m ²	Área inundada		Sup./m ²
185 m		-	30 m		222.724/22,2
250 m		633.331/63,3	60 m		120.096/12
300 m		-	90 m		87.313/8,7
350 m		-	120 m		70.875/7
406 m		-	150 m		81.032/8,1
			> 150 m		51.291/5,1

Pendiente		Sup./ha	Red de pavimento		NO
Área inundada		Sup./m ²	Área inundada	SI	
0 – 5,82 %		140.744 /14	Eje de calles pavimentadas		295
5,83 – 11,6 %		248.597/24,8	Eje de calles no pavimentadas		56
11,7 – 17,9 %		194.915/19,4			
18 - 26,4 %		46.986 /4,6			
26,5 – 61,8 %		2089/0,2			

Densidades urbanas		Sup./ha	Espacios verdes		Sup./ha
Área inundada		Sup./m ²	Área inundada		Sup./m ²
Sin edificaciones		59.199/5,9	100 m		235.480/23,5
Densidad baja		24.630/2,4	200 m		190.396/19
Densidad media		260.466/26	300 m		146.359/14,6
Densidad alta		289.035/28,9	400 m		52.710/5,2
			500 m		8385/0,8

Fuente: elaboración personal

La tabla n°6 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 los geodatos transformados para la elaboración del modelo e integrados dentro del HEC-RAS.

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.

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

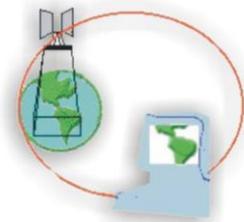


del agua sobre el terreno. Si asociamos esta variable con la red de pavimento podemos afirmar que un 84% del área se ubica sobre ejes de calles pavimentadas, mientras que un 16% se localiza sobre calles de tierra.

Los buffers de distancia 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.

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

A partir de los productos cartográficos obtenidos a lo largo de los apartados 5.1 y 5.1.1 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. En esta investigación se realizó una adaptación local del método elaborado por el Instituto Australiano de Resiliencia ante Desastres presentado en el apartado 4, partiendo de una operación de multiplicación entre las capas ráster 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 n°6 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 n°7. Adaptación de la escala de peligro AEMI 2013

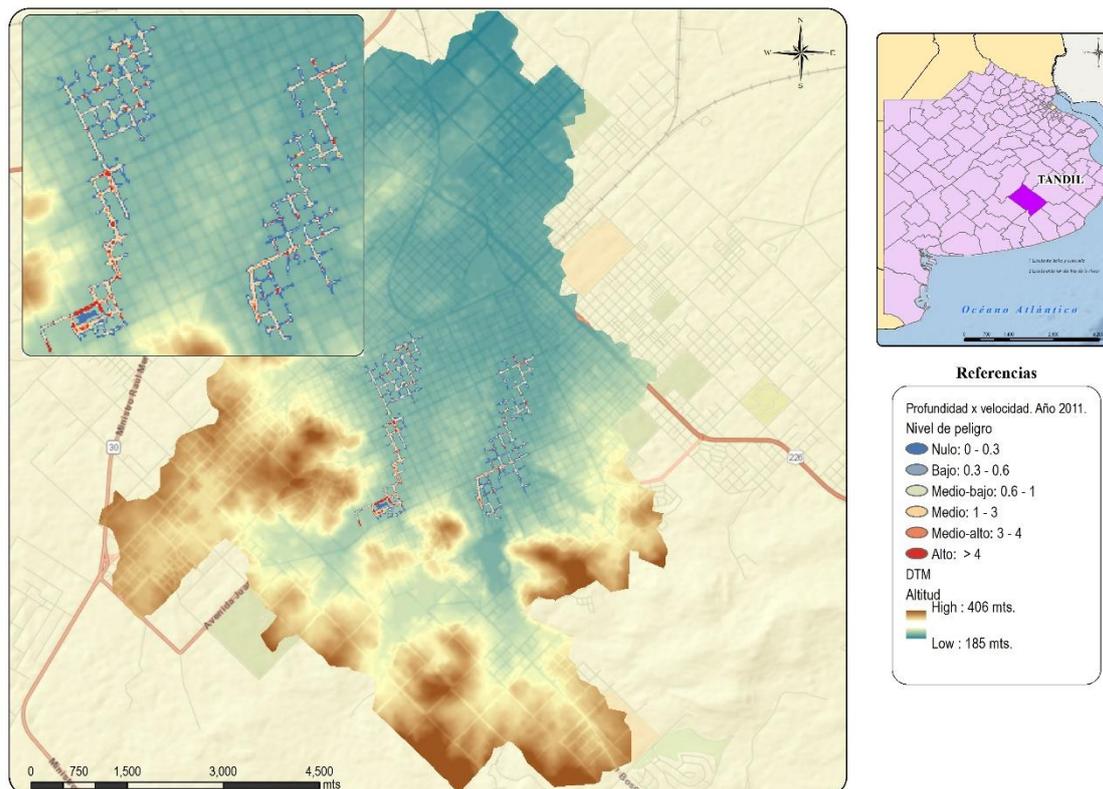
Clasificación del peligro y vulnerabilidad	Límite de clasificación (D y V) (m ² /s)	Límites de profundidad (D) (m)	Límites de velocidad (V) (m/s)
H1: Nulo	$D \cdot V \leq 0.3$	0.3	2.0
H2: Bajo	$D \cdot V \leq 0.6$	0.5	2.0
H3: Medio-bajo	$D \cdot V \leq 1.0$	1.2	2.0
H4: Medio	$D \cdot V \leq 3.0$	2.0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

Fuente: elaboración personal en base a la escala de la guía AEMI 2013

El mapa n°35 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.



Mapa n°35. Nivel de peligro de inundaciones 2011



Fuente: elaboración personal. ArcGIS 10.2

La tabla n°8 representa la distribución de superficies en m² por cada rango de peligro. Los valores más importantes para analizar son los que corresponden a los niveles medio (H4), medio-alto (H5) y alto (H6) integrando superficies entre 206.299 m², 27.770 m² y 58.868 m² según se observa en el gráfico n°3. Estas áreas se ubican alrededor de los accesos principales y ejes de circulación vial secundarios.

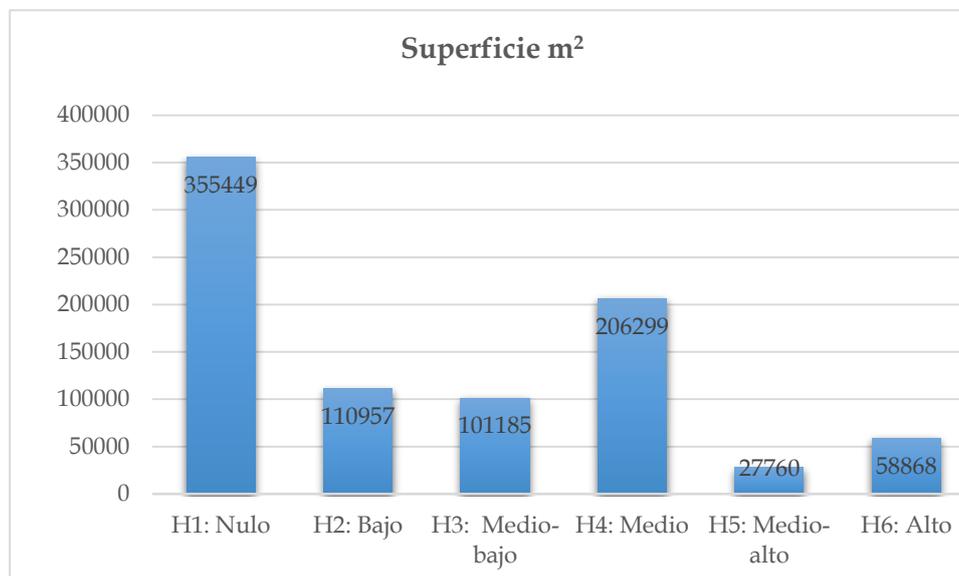


Tabla n°8. Superficies de los niveles de peligro (m²)

D x V	m ²
H1: Nulo	355.449
H2: Bajo	110.957
H3: Medio-bajo	101.185
H4: Medio	206.299
H5: Medio-alto	27.760
H6: Alto	58.868

Fuente: elaboración personal

Gráfico n°3. Superficies de los niveles de peligro (m²)



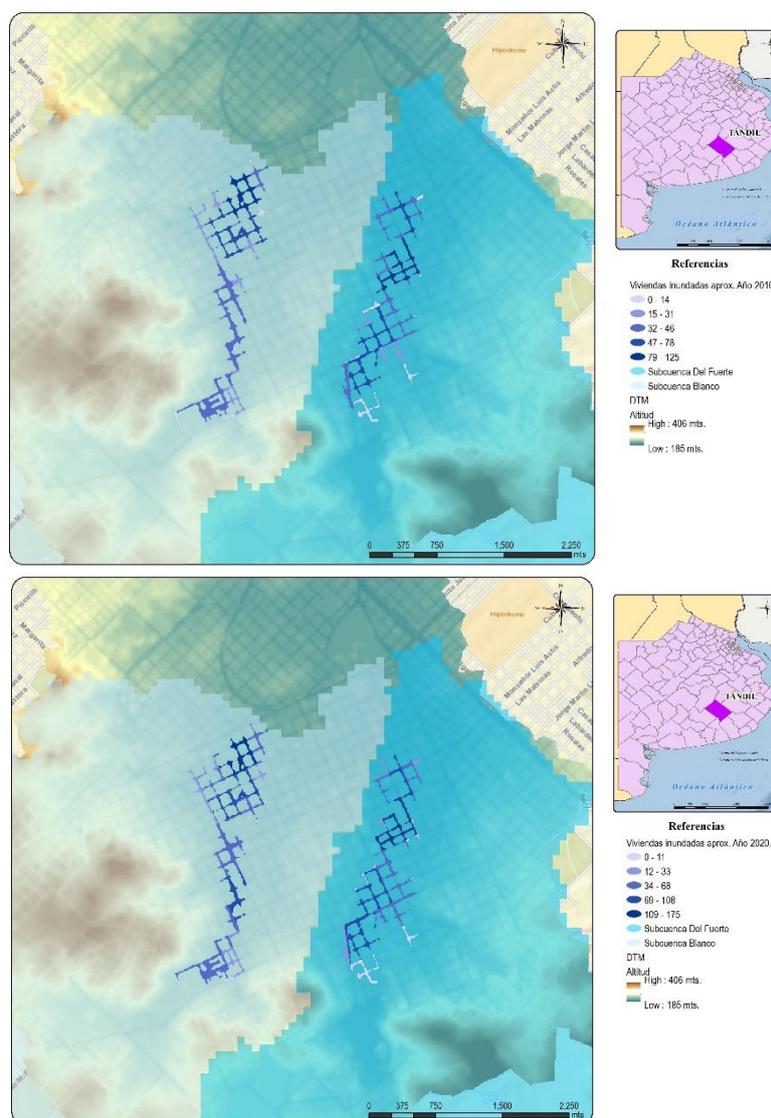
Fuente: elaboración personal

Asimismo podemos hacer una asociación con el área de afectación de las viviendas comparando los datos del INDEC para el año 2010 y el precenso de viviendas



del censo 2020³¹. La interpretación de los niveles de peligro indicados miden potenciales grados de vulnerabilidad de las viviendas y la población expuesta dentro del área simulada como se muestra en el mapa n°36.

Mapa n°36. Vulnerabilidad de las viviendas en el área simulada. Año 2010 y 2020.



Fuente: elaboración personal. ArcGIS 10.2

La distribución de los valores en cada uno de los intervalos evidencian un aumento de las viviendas afectadas en el área simulada debido al crecimiento urbano y

³¹ <https://precensodeviviendas.indec.gov.ar/mapa>

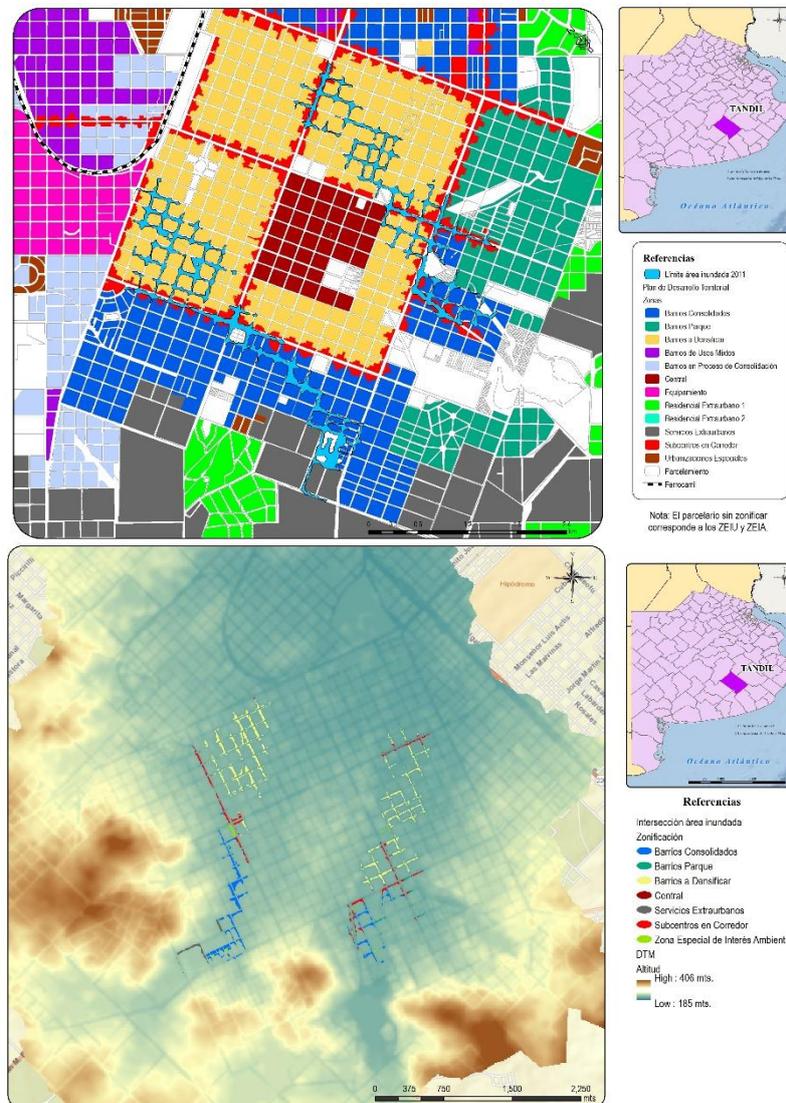


la densificación del área construida que impactan en la red drenaje y la infiltración del suelo. Estas dimensiones permiten repensar como se planifica una ciudad y como se distribuyen las zonas del plan de desarrollo territorial. La reglamentación de los indicadores urbanísticos para tomar medidas que regulen los usos y permitan planificar las zonas del PDT debe integrar y predecir variables de amenaza y vulnerabilidad ante la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos.

En el mapa n°37 se discriminaron las zonas sobre las que se observa el área anegada y luego mediante un análisis de intersección se mapeó las que reciben los mayores impactos.



Mapa n°37. Impactos en la zonificación de usos de suelo



Fuente: elaboración personal. ArcGIS 10.2

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 como refleja la tabla n°9 y el gráfico n°4.

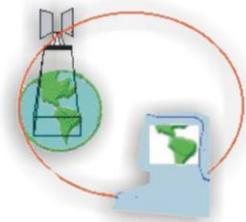
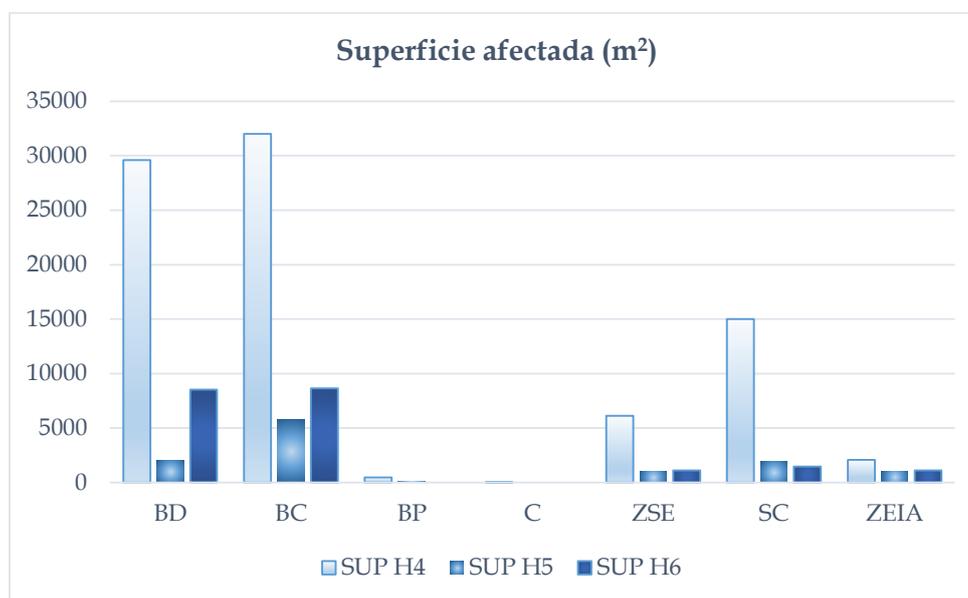


Tabla n°9. Superficie de zonas del PDT afectadas por el evento (m²)

ZONIFICACION	SUP H4	SUP H5	SUP H6
Barrios a densificar (BD)	29.607	2066	8529
Barrios consolidados (BC)	31.990	5795	8640
Barrios Parque (BP)	471	109	0
Central (C)	4.9	0	0
Servicios Extraurbanos (ZSE)	6131	995	1113
Subcentros en corredor (SC)	15018	1917	1477
Zona Especial de Interés Ambiental (ZEIA)	2081	1042	1126

Fuente: elaboración personal

Gráfico n°4. Superficie de zonas del PDT afectadas por el evento (m²)



Fuente: elaboración personal

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.

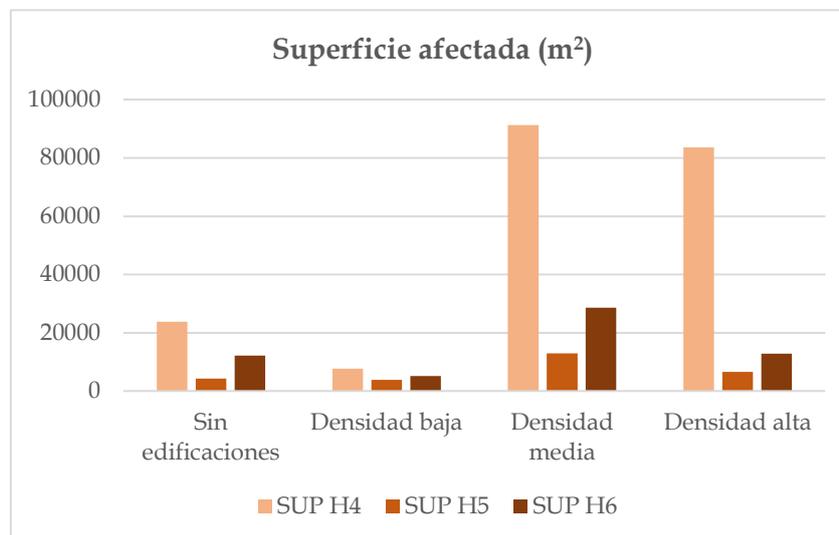
Si establecemos una asociación de las zonas del plan de ordenamiento con la evolución de las densidades urbanas presentes en la tabla n°10 junto al gráfico n°5, el cuarto nivel de peligro (H4) es el que más impacta dentro del área simulada con densidades urbanas medias y altas.

Tabla n°10. Superficie de densidades urbanas afectadas por el evento (m²)

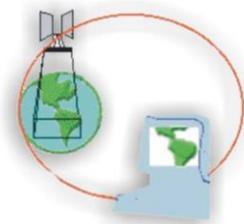
Densidad urbana	SUP H4	SUP H5	SUP H6
Sin edificaciones	23.814	4285	12147
Densidad baja	7674	3874	5242
Densidad media	91236	12947	28611
Densidad alta	83575	6653	12869

Fuente: elaboración personal

Gráfico n°5. Superficie de densidades urbanas afectadas por el evento (m²)



Fuente: elaboración personal



Finalmente es necesario evaluar las viviendas afectadas haciendo énfasis en la calidad de los equipamientos colectivos. Como se ha desarrollado en el apartado 4.2 los servicios se midieron según la calidad de conexión, calidad de los materiales y calidad constructiva de las viviendas.

La tabla n°11 cuantifica el número aproximado de viviendas afectadas para la subcuenca del Arroyo Blanco y la del Fuerte considerando el total de viviendas de cada variable.

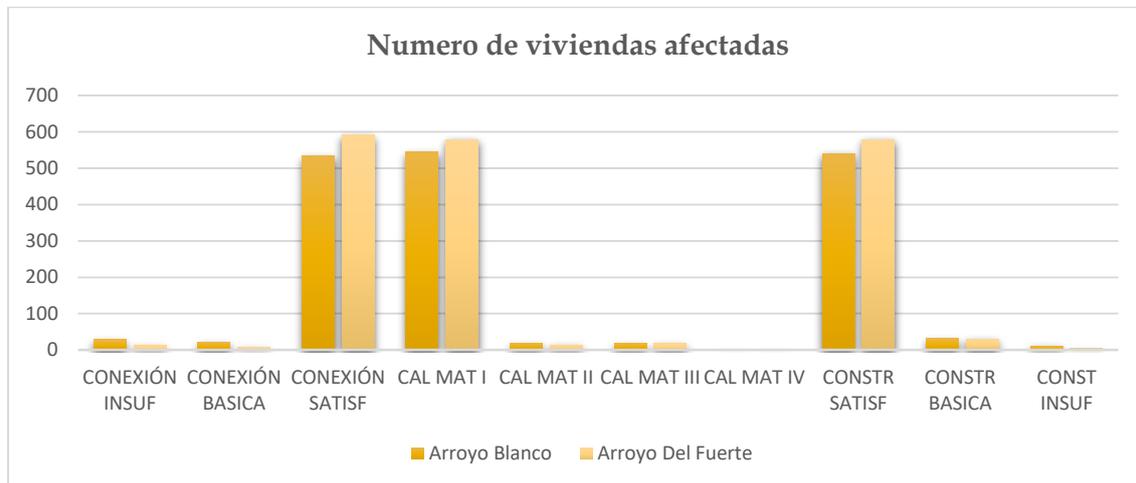
Tabla n°11. Viviendas afectadas según equipamientos colectivos: calidad de conexión a los servicios, calidad de los materiales y calidad constructiva

Calidad de los equipamientos colectivos	Arroyo Blanco (Viviendas)	Arroyo del Fuerte (Viviendas)
Conexión Insuficiente	28	12
Conexión Básica	21	8
Conexión Satisfactoria	534	592
Cal Mat I	545	579
Cal Mat II	19	14
Cal Mat III	19	18
Cal Mat IV	1	1
Construcción Satisfactoria	540	579
Construcción Básica	31	30
Construcción Insuficiente	11	4

Fuente: elaboración personal.



Gráfico n°6. Número de viviendas afectadas según la calidad de los equipamientos colectivos



Fuente: elaboración personal

La tabla n°11 y el gráfico n°6 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.



Consideraciones finales

Los resultados de la modelización hidrodinámica llevada a cabo en entornos 2D para los dos momentos analizados 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.

Esta investigación presenta grandes aportes metodológicos y procedimentales para el estudio de la dinámica del escurrimiento superficial en cuencas urbanas. Principalmente refleja como los procesos urbanos constituyen los principales factores de riesgo que determinan el impacto a distintas escalas en el proceso de escorrentía generando anegamientos e inundaciones. La magnitud de las consecuencias dependerá de la medición del evento en términos de su intensidad, duración, frecuencia u ocurrencia y recurrencia. Cualquier resultado será materializado en el territorio bajo diferentes grados afectación en la población.

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.

Las técnicas de geoprocésamiento aplicadas para la elaboración del modelado hidrológico han pasado por varias etapas a lo largo del recorrido de esta investigación. La capacidad de vincular una variedad de herramientas geotecnológicas garantizó la correcta interoperabilidad entre los inputs generados y los resultados de cada fase del procedimiento metodológico desarrollado en cada capítulo. Se destaca la posibilidad de integrar satisfactoriamente diversas fuentes y modelos de geodatos para la simulación de escurrimiento superficial; algunas de ellas partieron del uso de imágenes de sensores ópticos como el satélite Landsat y las imágenes radar proveniente del modelo digital de elevaciones SRTM - ALOS - PALSAR para la obtención de un nuevo modelo digital del



terreno; otras derivaron de la confección de capas vectoriales provistas por fuentes primarias y secundarias definidas como variables que configuran el espacio urbano y los componentes geométricos propio del análisis de redes integrados dentro del modelo hidrológico. Si bien esta última etapa se encuentra en proceso de redefinición, la integración de modelos 1D en esquemas 2D será central para discutir y validar escenarios en áreas urbanas con diferentes características físicas y urbanas. La posibilidad de asignar y ponderar atributos que relacionen, conecten e integren cada uno de estos elementos de la trama urbana con el modelado del escurrimiento en un simulador de crecidas como el HEC-RAS es la respuesta para la búsqueda de soluciones a distintas escalas. En este recorrido también debemos mencionar las limitaciones para lograr la construcción de un modelo que represente de manera fiel la realidad. Los principales obstáculos derivaron de la naturaleza de la obtención del dato para la edición de la red pluvial, las obras de ingeniería y la configuración de sus atributos para simular el escurrimiento en entornos 1D, la falta de instrumental (drones y GPS geodésico) para volar zonas de interés que podrían haberse contemplado en un inicio dentro del modelo hidrológico para su calibración, ajuste y validación y la disponibilidad de instrumental in situ para relevar registros pluviométricos y complementar los escenarios de simulación.

La escala de trabajo para este estudio conlleva a asumir una precisión y junto a ello un determinado nivel de abstracción para el análisis espacial de la modelización de los resultados. En primer lugar, se parte de un modelo digital de elevación de 12,5 m al que se logra pre procesar e incorporar las variables físicas y urbanas (topografía, pendiente, catastro y densidades urbanas) para que intervengan en la simulación. En segundo lugar, la extracción y análisis de densidades urbanas mediante el procesamiento de imágenes satelitales se llevó a cabo con fuentes de información de distintas unidades espaciales generando errores en el método de validación final, por lo que es importante considerar su nivel de exactitud. En tercer lugar, la exageración de la escala vertical para direccionar el escurrimiento en favor de la pendiente y discriminar el catastro urbano en el modelo digital del terreno distorsiona la interpretación de los valores físicos de profundidad y velocidad en los escenarios. De igual manera la asignación de coeficientes de rugosidad determina el grado de permeabilidad o impermeabilidad del suelo y favorece u obstaculiza el proceso de escorrentía. En este caso se diferenciaron rugosidades para las clases de densidades urbanas definiendo



grados de superficie construida y no coberturas de usos de suelo. Por lo tanto las generalizaciones pueden partir de mapas de riesgo para la totalidad de la cuenca logrando una imprecisión de las simulaciones o priorizar un enfoque que se sitúe a nivel de subcuenca o en cada uno de los tramos de la cuenca urbana y observar los resultados que arroja para cada zona de interés. Aquí radica la importancia de la elección de un modelo que integre cada una de las dimensiones y explique de la mejor manera la configuración y dinámica territorial de una ciudad con el objetivo de detectar zonas anegadas o potencialmente inundables.

En suma los escenarios presentados para los dos momentos constituyen una herramienta de gran potencialidad para continuar avanzando en la representación de la realidad a una escala urbana adecuada. Es importante poder replicar las modelizaciones para distintas zonas que resultan interesantes para analizar el peligro y la vulnerabilidad frente a la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos. Algunas de ellas se ubican sobre las obras de ingeniería del Arroyo del Fuerte y el ramal H, como así también en zonas de expansión urbana hacia el eje N-NE-NO. Asimismo para el eje N es importante contemplar el recorrido del arroyo Langueyú que escurre de manera libre sellando el final del entubamiento. El trabajo en campo bajo estaciones de aforo y la evaluación de la profundidad y el tiempo de permanencia de agua durante y después del evento sería de gran relevancia para validar cada una de las áreas afectadas. Estas muestras y las modelizaciones vinculadas con los esquemas unidimensionales (1D) que tengan en cuenta el recorrido de la infraestructura pluvial en la red de drenaje a través de sus conductos y secciones transversales, variará significativamente el resultado logrando la precisión requerida para los escenarios de trabajo y el ajuste de los coeficientes de rugosidad adoptados. Este punto puede significar un nuevo obstáculo que deriva del costo computacional que implica modelar el terreno bajo este entorno, la redefinición de las mallas utilizadas para elaborar los escenarios y la configuración del paso del tiempo durante la simulación.

La determinación de zonas de peligro a partir de la escala técnica AEMI 2013 constituye un antecedente central desde la Geografía Aplicada para detectar zonas de mayor y menor vulnerabilidad conjugando el producto de mapas de profundidad (*depth*) y velocidad (*velocity*).

La evaluación del modelo hidrológico mediante los escenarios de velocidad y profundidad de flujo de escurrimiento para 1996 y 2011 permiten establecer

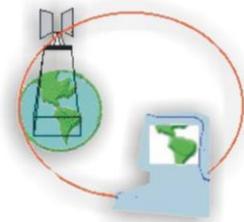


asociaciones entre las variables consideradas. La influencia de la topografía y la pendiente como variables físicas determinan restricciones y aceleración del escurrimiento. Asimismo las variables urbanas como la superficie edificada, las áreas verdes y la red de infraestructura pluvial y pavimento permiten dar cuenta del nivel de concentración del agua debido al grado de densificación de la ciudad, a la vulnerabilidad de la calidad de las viviendas y el acceso a los servicios, al aumento de superficie impermeable y disminución de la infiltración, a la falta de superficies verdes como amortiguadores de la velocidad y su función en la capacidad de brindar mayor permeabilidad del suelo y a la falta de mejoras en el funcionamiento de la red pluvial.

La utilización de los 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. El planteo de medidas estructurales (intensivas y extensivas) que retarde, aceleren y desvíen el escurrimiento deben integrarse con el manejo, control y capacidad de gestión regulando los usos de suelo de la ciudad para mitigar los impactos. La urbanización y el crecimiento de la ciudad hacia zonas especulativas, con conflictos de usos y que comprometen la dinámica natural del paisaje implica analizar los criterios definidos en la zonificación provista por el PDT. Por ello, cuantificar el riesgo de manera real requiere mejorar la precisión del modelo hidrológico e hidráulico e incorporar un mayor número de variables en consideración, ya que las curvas de vulnerabilidad se establecen en base a los umbrales establecidos (número de píxeles) para cada categoría utilizada en los mapas obtenidos.

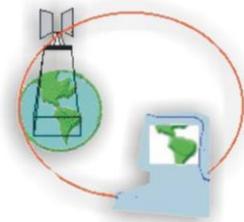
Para concluir esta tesis constituye una guía metodológica para detectar, analizar anegamientos y evaluar zonas potencialmente inundables a escala urbana. Los interrogantes que surgen permiten pensar en la predicción de nuevos escenarios con el objetivo de reducir la incertidumbre y validar los resultados obtenidos. La consideración de nuevas variables predictivas, ponderadas dentro de la configuración del modelo e incorporando otras dimensiones del riesgo que hagan más énfasis en la ecuación vulnerabilidad y exposición, analizará la capacidad y posibilidad de adaptación y resiliencia de los ecosistemas urbanos ante el peligro y la amenaza.

Los alcances y desafíos resultantes de la aplicación de modelos de alta resolución producto de vuelos de drones en las zonas de interés permitirían reducir el nivel de abstracción en las simulaciones obtenidas en esquemas 2D e interactuar con toda una serie de nuevos parámetros para integrar los modelos 1D. Algunos de las



variables a analizar estarían definidas por la capacidad de diferenciar rugosidades del terreno según coberturas de uso, modificar los indicadores de superficie urbana edificada con una mayor resolución espacial mediante imágenes de alta resolución (VHR), determinar el desarrollo de obras factibles para regular el proceso de escorrentía o ajustar los parámetros de hietogramas y construcción de hidrogramas del flujo y caudales diferenciales para cada subcuenca.

El ajuste de la sensibilidad del modelo según el área de mallado de la cuenca plantea la capacidad de predecir la ejecución de medidas estructurales para la gestión de inundaciones en áreas urbanas e incluso para analizar escenarios de crecimiento y expansión urbana a largo plazo. El aporte de nuevos índices o productos derivados de las técnicas de la teledetección permitirá generar nuevas respuestas del modelo y establecer otros indicadores para la clasificación de umbrales de la escala técnica AEMI. Sin duda estos aportes disminuirán la incertidumbre de los escenarios simulados y servirán para validar los resultados obtenidos. 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 la sustentabilidad ambiental. Siguiendo un propósito de transferencia esta investigación constituye un instrumento de ayuda a los agentes tomadores de decisión para la planificación y gestión territorial, posibilitando la necesidad de trabajar y dialogar en forma interdisciplinaria y desde la gestión integral del riesgo.



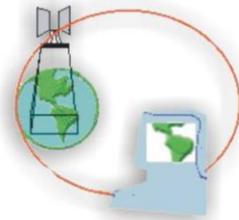
Bibliografía

- AHMAD, S.; SIMONOVIC, S. (2006). An Intelligent Decision Support System for Management of Floods. **Water Resources Management**. Volumen N°20 (3). 391-410. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/226337535_An_Intelligent_Decision_Support_System_for_Management_of_Floods
- ACKERMAN, C.T.; 2002. HEC-GeoRAS. An extension for support of HEC-RAS using ArcView. **Hydrologic Engineering Center**, USACE, Davis, California (EE.UU.).
- ALIAGA, V.; FERRELLI, F.; ALBERDI ALGARAÑAZ, E.; BOHN, V.; PICCOLO, M. (2016). Distribución y variabilidad de la precipitación en la región pampeana, Argentina. **Cuadernos de Investigación Geográfica**. Volumen N°42 (1). 261-280. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/299654019_Distribucion_y_variabilidad_de_la_precipitacion_en_la_Region_Pampeana_Argentina
- AUSTRALIAN EMERGENCY MANAGEMENT INSTITUTE (AEMI) (2013). Managing the floodplain: A guide to best practice in flood risk management in Australia. **Australian Emergency Handbook (7)**. Canberra. 110 pp.
- AUSTRALIAN INSTITUTE FOR DISASTER RESILIENCE (AIDR) (2014). **Australian Disaster Resilience Guideline 7-3: Technical flood risk management guideline: Flood hazard**, CC BY-NC. 33 pp.
- BARRANQUERO, R.; VARNI, M.; RUIZ DE GALARRETA, A. (2015). Relación arroyo-acuífero en un sistema hídrico afectado por explotación antrópica. **Revista de Estudios Ambientales**. Volumen N°3 (2). ISSN: 2347-0941. 23pp.
- BARRANQUERO, R.; RUIZ DE GALARRETA, A.; VARNI, M.; BANDA NORIEGA, R. (2011). Evaluación preliminar de nitratos en la cuenca del arroyo Langueyú, partido de Tandil, Buenos Aires. **VII Congreso Argentino de Hidrogeología y V Seminario Hispano Latinoamericano sobre temas actuales de la hidrología subterránea**. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/319621335_EVALUACION_PRELIMI



NAR DE NITRATOS EN LA CUENCA DEL ARROYO LANGUEYU PARTI DO DE TANDIL BUENOS AIRES

- BAXENDALE, C. (2015). Geografía, ordenamiento territorial y Sistemas de Información Geográfica. Articulaciones conceptuales para aplicaciones en la planificación y gestión territorial. Capitulo I. Parte I. Sistemas de información geográfica actuales. En **Miraglia, M.; Caloni, N.; Buzai, G. (org). Sistemas de Información Geográfica en la investigación científica actual**. Universidad Nacional de General Sarmiento. Los Polvorines. E-Book.- (Cuestiones metropolitanas). ISBN 978-987-630-209-8. p. 19-32.
Disponible en: https://www.ungs.edu.ar/wp-content/uploads/2018/03/668_SIG_Actual_FINAL_web.pdf
- BERTONI, J. (2004). Urbanización y drenaje urbano en Argentina. En **Inundaciones urbanas en Argentina**. J. Bertoni (Organizador). Global Water Partnership, GWP-SAMTAC. Universidad Nacional de Córdoba. Secretaría de Ciencia y Técnica, SECyTy Red Argentina de Capacitación y Fortalecimiento de la Gestión integrada de los Recursos Hídricos. CAP-NET. Córdoba. pp.43-74.
Disponible en:
<https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2014/03/Inundaciones-Urbanas-en-Argentina.pdf>
- BERTONI, J. (2019). Medidas para la reducción del riesgo de inundaciones urbanas. En: Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. **Inundaciones urbanas y cambio climático: Recomendaciones para la gestión**. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, 33-47. Disponible en:
<https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/manualinundaciones.pdf>
- BERTONI, J.; TUCCI, C. (1993). Precipitación. Capítulo 5 en: Tucci, C.E.M. (org.). Hidrología, Ciencia y Aplicación. Colección ABRH, Volumen N° 4. 2da edición. 943 p. Brasil.
- BLADÉ, E.; SÁNCHEZ, M.; SÁNCHEZ, J.; NIÑEROLA, D.; GÓMEZ, M. (2009). **Modelación numérica en ríos en régimen permanente y variable. Una visión a partir del modelo HEC–RAS**. Ediciones UPC. ISBN: 978-84-9880-389-1. 216 pp. Disponible en:
<https://mega.nz/file/TBpzgaSL#RUXcZ4BmqyOGvIQVA50lxP9rplC0Hz92Fw6okeRYnG4>



- BLADÉ, E.; CEA, L.; CORESTEIN, G.; ESCOLANO, E.; PUERTAS, J.; VÁZQUEZ-CENDÓN, E.; DOLZ, J.; COLL, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. **Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería**. Volumen N°30 (1). p.1-10.
- BOHN, V.; PICCOLO, C.; PERILLO, G. (2011). Análisis de los periodos secos y húmedos en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). **Revista de climatología**. Volumen N° 11. pp. 31-43 ISSN: 1578-8768. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/256525092_Analisis_de_los_periodos_secos_y_humedos_en_el_sudoeste_de_la_provincia_de_Buenos_Aires_Argentina
- BUZAI, G. (2001). Paradigma Geotecnológico, Geografía Global y CiberGeografía, la gran explosión de un universo digital en expansión. **GeoFocus** (Artículos). Volumen N°1, p. 24-48.
- BUZAI, G. (2004). **Geografía Global**. Lugar Editorial. Buenos Aires. 221 pp.
- BUZAI, G. (2007). Dilemas de la relación Geografía-SIG entre la disciplina, la interdisciplina y la transdisciplina. **GeoFocus-Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica** (Ed.). Volumen N° 7. pp.5-7. Disponible en: [http://geofocus.rediris.es/2007/Editorial2_2007_\(pdf\)](http://geofocus.rediris.es/2007/Editorial2_2007_(pdf)).
- BUZAI, G. (2011). Geografía y sistemas de información geográfica. Conferencia Magistral de apertura. **Encuentro de Geógrafos/as de América Latina (EGAL)**. Costa Rica. 44 pp. Disponible en: [http://www.egal2011.geo.una.ac.cr/phocadownload/ponencias/Eje_CIG/CIG000%20CONFERENCIA%20MAGISTRAL_Gustavo%20Buzai_\(pdf\)](http://www.egal2011.geo.una.ac.cr/phocadownload/ponencias/Eje_CIG/CIG000%20CONFERENCIA%20MAGISTRAL_Gustavo%20Buzai_(pdf)).
- BUZAI, G (2015a). Conceptos fundamentales del Análisis Espacial que sustentan la investigación científica basada en Geotecnologías. En FUENZALIDA, M.; BUZAI, G. D.; MORENO JIMÉNEZ, A.; GARCÍA DE LEÓN, A. **Geografía, geotecnología y análisis espacial: tendencias, métodos y aplicaciones**. Parte B. Análisis espacial y Geotecnologías: Conceptos, métodos y técnicas. p. 56-72. 1ra ed., Santiago de Chile: Editorial Triángulo.
- BUZAI, G; GARCÍA DE LEÓN, A. (2015). Balance y Actualidad de la Geografía Cuantitativa. En FUENZALIDA, M.; BUZAI, G. D.; MORENO JIMÉNEZ, A.; GARCÍA DE LEÓN, A. **Geografía, geotecnología y análisis espacial:**



tendencias, métodos y aplicaciones. Parte A. Epistemología geográfica: cambios y actualidad. p. 31-54. 1ra ed., Santiago de Chile: Editorial Triángulo.

- BUZAI, G. (2015b). Perspectivas teóricas de la Geografía en la evolución de los Sistemas de Información Geográfica. Capítulo II. Parte I. Sistemas de información geográfica actuales. En **Miraglia, M.; Caloni, N.; Buzai, G. (org). Sistemas de Información Geográfica en la investigación científica actual.** Universidad Nacional de General Sarmiento. Los Polvorines. E-Book.- (Cuestiones metropolitanas). ISBN 978-987-630-209-8. p. 33-47.

Disponible en: https://www.ungs.edu.ar/wp-content/uploads/2018/03/668_SIG-Actual_FINAL_web.pdf

- BUZAI, G. (2016). Geografía Aplicada a la solución de problemáticas sociales. Capítulo 1. En Linares, S (Coord), Gustavo D. Buzai, Natasha Picone, Adela, Tisnés, Juan Pablo Celemín, Inés Rosso, María Lorena La Macchia y Mauro Ortmann. **Soluciones espaciales a problemas sociales urbanos. Aplicaciones de Tecnologías de la Información Geográfica a la planificación y gestión municipal.** ISBN 978-950-658-392-7. pp.17-29.

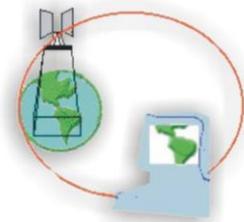
Disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/304628948_Geografia_Aplicada_a_la_solucion_de_problematicas_sociales

- BUZAI, G. (2017). La geografía como ciencia aplicada. Articulación de enfoques en perspectiva sistémica. **Revista Vientos del Norte.** ISSN: 2591-3247 Volumen I, Número 5 - 7-17. Universidad Nacional de Catamarca - Secretaría de Ciencia y Tecnología Editorial Científica Universitaria. Disponible en:

<http://www.editorial.unca.edu.ar/Publicacione%20on%20line/CD%20VIENTOS%202017/PDF/Vol%201/Autor%201%20Buzai.pdf>

- CAPUTO, M.G; HERZER, H. (1987). Reflexiones sobre el manejo de las inundaciones y su incorporación a las políticas de desarrollo regional. **Revista de Ciencias Sociales: Desarrollo Económico.** Volumen N° 27.10 pp.
- CARBALLO, T.; GOLDBERG, S. (2014). **Comunidad e información ambiental del riesgo. Las inundaciones y el Rio Luján.** Buenos Aires: Editorial Dunken.165 pp.
- CARDONA, O. (2001). Vulnerabilidad y Riesgo desde una perspectiva holística. **Estimación Holística del Riesgo Sísmico utilizando Sistemas Dinámicos**



Complejos. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, UPC, Barcelona. pp. 99-134.

- CASADO, A.; PICONE, N. (2018). Aplicabilidad de los datos grillados para el análisis espaciotemporal de las precipitaciones, provincia de Buenos Aires (Argentina). Revista **Párrafos Geográficos** ISSN 1853-9424. Volumen N°17, N° 1. pp.46-62. Disponible en:
<http://www.revistas.unp.edu.ar/index.php/parrafosgeograficos/article/view/505>
- CENTRO DE ESTUDIOS HIDROGRÁFICOS, CEDEX. (2010). **IBER. Modelo de flujo bidimensional en ríos y estuarios. BASES CONCEPTUALES HIDRÁULICAS EJEMPLOS.** Gobierno de España. Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino. Grupo de Ingeniería del agua y del medio ambiente. 49pp.
- CHOW, V.; MAIDMENT, D.; MAYS, L. (1994). **Hidrología Aplicada.** Bogotá. Ed McGraw – Hill. 583 p.
Disponible en: <https://baixardoc.com/documents/hidrologia-aplicada-ven-te-chow-5cae52662105a>
- CHUVIECO, E. (2008). **Teledetección Ambiental. La observación de la tierra desde el espacio.** Editorial Ariel. Tercera edición actualizada 2008. 62 p.
- CHUVIECO, E. 2010. **Teledetección Ambiental. La observación de la tierra desde el espacio.** Editorial Planeta, S. A. Barcelona, España (Edición actualizada). 591 pp.
- CIFUENTES, M. R. (2020). Estudio ecohidrológico del embalse eutrófico Lago del Fuerte (Tandil, Provincia de Buenos Aires). **Tesis de doctorado en Ciencias Naturales.** Universidad Nacional de La Plata. 178 pp. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/112544>
- 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 pp.
- 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, septiembre de 2018. pp. 2064-2075.

- COSTABILE, P.; COSTANZO, C. (2019). ¿Is local flood hazard assessment in urban areas significantly influenced by the physical complexity of the hydrodynamic inundation model? **Journal of Hydrology**. Volumen N° 580 (1). 26 pp. Disponible en:
https://www.researchgate.net/publication/336534647_Is_local_flood_hazard_assessment_in_urban_areas_significantly_influenced_by_the_physical_complexity_of_the_hydrodynamic_inundation_model
- CUSHING, M. (2008). Desarrollo de Mapas de Relieve. Hidrografía y Derivados para Suramérica. **Programa GeoSur. Corporación Andina de Fomento (CAF)**. U.S. Geological Survey (USGS). 20 pp. Disponible en:
[http://www.geosur.info/geosur/contents/Papel_Concepto_Componente_SRTM_Programa_GeoSUR.\(pdf\)](http://www.geosur.info/geosur/contents/Papel_Concepto_Componente_SRTM_Programa_GeoSUR.(pdf)).
- DALPONTE, D.; RINALDI, P.; CAZENAVE, G.; USUNOFF, E.; VIVES, L.; VARNI, M.; VENERE, M.; CLAUSSE, A. (2007) .A validated fast algorithm for simulation of flooding events in plains. **Revista Wiley InterScience. Hydrological Process**. Volumen N°21. N°8. pp. 1115–1124. Disponible en:
<http://www.researchgate.net/publication/230408147>
- DAPENG Y.; COULTHARD, T. (2015). Evaluating the importance of catchment hydrological parameters for urban surface water flood modelling using a simple hydro-inundation model. **Journal of Hydrology**. Department of Geography, Loughborough University, Department of Geography, Environment and Earth Science, University of Hull. 46 pp.
- DEVOTO, G. (2002). Regionalización de lluvias intensas en Argentina. **XIX Congreso Nacional del Agua**. Villa Carlos Paz, Argentina. Anales en CD.
- FAJARDO, L.; ENTRAIGAS, I.; SCIOLI, C. (2017). Aplicaciones hidrológicas del Modelo digital de elevación operacional en la zona serrana del arroyo del Azul. **XXVI Congreso Nacional del Agua. CONAGUA**. Córdoba. Argentina. 9 pp.
- FELICÍSIMO, A. M. (1994). **Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales**, Pentalfa, Oviedo.118 pp. Disponible en:
https://www.academia.edu/2807451/Modelos_digitales_del_terreno



- FELICÍSIMO, A. M. (1999). **La utilización de los MDT en los estudios del medio físico**. 15 pp.
Disponible en https://www6.uniovi.es/~feli/pdf/ITGE_150a.pdf
- FENOGLIO, E. P. (2019). (Comp). **Inundaciones Urbanas y Cambio Climático. Recomendaciones para la gestión**. 1a ed mejorada. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. ISBN 978-987-47402-6-7. 156 pp. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/manualinundaciones.pdf>
- FERNÁNDEZ GARCIA, F. (2005). Creación de nuevos mapas a partir de MDE. Aplicación de las funciones de análisis de superficies. (Moreno Giménez, Antonio coord.). **Sistemas y Análisis de la Información Geográfica. Manual de autoaprendizaje con ArcGIS**. Ra-Ma. Madrid. pp. 623-642.
- FERNÁNDEZ PATO, J.; GARCÍA NAVARRO, P. (2018). Development of a New Simulation Tool Coupling a 2D Finite Volume Overland Flow Model and a Drainage Network Model. **Geosciences**. Volumen N°8 (288). Disponible en: <https://www.mdpi.com/2076-3263/8/8/288>
- FERRANDO, F. (2006). Sobre inundaciones y anegamientos. **Revista de Urbanismo**. Volumen N°15. Facultad de Arquitectura, Universidad de Chile. Disponible en: <https://revistaurbanismo.uchile.cl/index.php/RU/article/view/5129/5011>
- FIDALGO, F., DE FRANCESCO, F. O. y PASCUAL, R. (1975). Geología superficial de la llanura bonaerense. **Relatorio. VI congreso Geológico Argentino**. pp. 103-138.
- FLORES, R.M.; GIACONI, L.M. (2010). Aspectos geotécnicos de la fundación de la presa Ramal H, Tandil. Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. CAMSIG 2010, Mendoza, Argentina. 10 pp. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/26610>
- FUENZALIDA, M.; BUZAI, G. D.; MORENO JIMÉNEZ, A.; GARCÍA DE LEÓN, A. (2015). **Geografía, geotecnología y análisis espacial: tendencias, métodos y aplicaciones**. Parte A. Epistemología geográfica: cambios y actualidad y Parte B. Análisis espacial y geotecnologías: Conceptos, métodos y técnicas. pp. 1-31 y pp. 55-99. 1ra ed. Santiago de Chile: Editorial Triángulo.



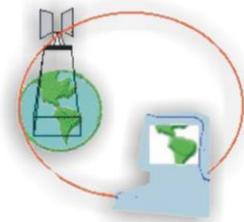
- GARCÍA, M.C. (1990). **Problemática ambiental urbana de la cuenca de los arroyos Blanco, Del Fuerte, Langueyú en el área urbana de Tandil.** Tesis de Licenciatura en Geografía. Departamento de Geografía, FCH-UNICEN. Tandil. 150 pp.
- GARCIA, M.C. (2015). Los Sistemas de Información Geográfica y su aplicación a estudios de riesgos. En **revista Nadir.** Revista electrónica Geográfica Austral. ISSN: 0718-7130. Volumen N° 7 (1). 14 pp. Disponible en: <http://revistanadir.yolasite.com/resources/Maria%20Celia%20Los%20Sistemas%20de%20Informacion%20G..pdf>
- GARCÍA, R. (2006). **Sistemas complejos: conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria.** Barcelona: Editorial Gedisa. 200 pp.
- GARCÍA, R. (2011). **Interdisciplinariedad y sistemas complejos.** Revista Latinoamericana de Metodología de las Ciencias Sociales ReLMeCS, volumen N° 1 (1). ISSN 1853-7863. 36 pp.
- GIACONI L. M. (2005). Aspectos geoambientales de Tandil – vulnerabilidad del acuífero freático y sus implicancias ambientales. Relatorio del **XVII Congreso Geológico Argentino.** Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/26614>
- GUEVARA OCHOA, C. (2015). Una metodología para el manejo integral de extremos hídricos en una cuenca rural en zona de llanura. Caso de estudio: cuenca arroyo Santa Catalina, provincia de Buenos Aires. **Tesis de Maestría en Ecohidrología.** Universidad Nacional de la Plata. 143 p. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/47518>
- GUEVARA OCHOA, C.; VIVES, L.; ZIMMERMANN, E.; MASSON, I.; FAJARDO, L.; SCIOLI, C. (2019). Analysis and Correction of Digital Elevation Models for Plain Areas. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.** Volumen N°85 (3). pp 209-219.
Disponible en: <https://www.ingentaconnect.com/content/asprs/pers/2019/00000085/00000003/art00015;jsessionid=eearlwpeje46.x-ic-live-03#>.



- GONZÁLEZ, S.; TORCHIA, N.; VIAND, J. (2015). Inundaciones urbanas y cambio climático. Primera Parte. En: Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. **Inundaciones urbanas y cambio climático: Recomendaciones para la gestión**. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, pp. 38 – 54 y pp. 73-78. Disponible en:
<https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/manualinundaciones.pdf>
- GUERRERO, M. (2019). Configuración espacial y procesos de gestión del recurso hídrico superficial en la ciudad de Tandil. Eventos hídricos e inundaciones entre 1951-2017. **Tesis doctoral en Geografía**. USAL. Universidad Nacional del Salvador. Resumen de tesis. 46 pp. Disponible en:
http://geousal.usal.edu.ar/archivos/geousal/docs/tesis_doctoral_guerrero.pdf
- GIL, C.; VILLANUEVA, I.; GODIKSEN, P. (2011). Efectos de la cartografía sobre la modelización hidráulica bidimensional de crecidas. **II Jornadas Ingeniería del Agua**. Barcelona, JIA. 10 pp.
- GÓMEZ OREA, D. (1993). Ordenación del territorio. Una aproximación desde el medio físico. Madrid. 25 pp. Disponible en:
<http://municipios.unq.edu.ar/modules/mislibros/archivos/Marco%20conceptua.pdf>
- GOMEZ OREA, D. (2003). **La ordenación territorial: Carácter, Alcance y Contenido**. Universidad Politécnica de Madrid. 17 pp. Disponible en:
<https://core.ac.uk/download/55526614.pdf>
- GOMEZ OREA, D.; GÓMEZ VILLARINO, M.T. (2018). Del impacto ambiental a la sostenibilidad: nuevo lenguaje para viejas ideas. **Revista Ambienta**. Número 123. NIPO 013-17-065-7. ISSN 1577-9491. 18 pp. Disponible en:
https://www.miteco.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_AM%2FPDF_AM_Ambienta_2018_123_54_71.pdf
- GUTH, P. L.; VAN NIEKERK, A.; GROHMANN, C. H.; MULLER J.P; HAWKER, L.; FLORINSKY, I.V.; GESCH, D.; REUTER HANNES I.; HERRERA-CRUZ V.; RIAZANOFF, S.; LÓPEZ-VÁZQUEZ, C.; CARABAJAL C.C.; CLÉMENT ALBINET, STROBL, P. (2021). Digital Elevation Models: Terminology and Definitions. **Remote Sensing**. Volumen N°13 (18). Disponible en:
<https://doi.org/10.3390/rs13183581>



- HAGGETT, P. (1994). **Geografía. Una síntesis moderna**. Universidad de Bristol. Barcelona. Ediciones Omega S.A. pp 20-27.
- HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER (2011). HEC-GEORAS. GIS Tools for Support of HEC-RAS using ArcGIS. **User's Manual. Version 4.3.93. US Army Corps of Engineers**. Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center. Davis. 244 pp.
- HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER. HEC (2016A). River Analysis System. **User's Manual. Version 5.0. US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources**. Hydrologic Engineering Center. Davis. 960 pp.
- HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER. HEC (2016B). River Analysis System. 2D Modeling. **User's Manual. US Army Corps of Engineers. Institute for Water Resources**. Hydrologic Engineering Center. Davis. 171 pp.
- HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER. HEC (2020). River Analysis System. HEC-RAS Mapper. **User's Manual. US Army Corps of Engineers. Institute for Water Resources**. Hydrologic Engineering Center. Davis. 149 pp. Disponible en: [https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS Mapper User's Manual.pdf](https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_Mapper_User's_Manual.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. Disponible en: [https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS 6.0 2D Modeling Users Manual.pdf](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. Disponible en: [https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS 6.0 Users Manual.pdf](https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_6.0_Users_Manual.pdf)
- HERZER, H. (1990). Los desastres no son tan naturales como parecen. **Medio ambiente y urbanización**. IIED. N° 3. Buenos Aires. pp 3-10.
- HERZER H. M. (2011). Construcción del riesgo, desastre y gestión ambiental urbana: Perspectivas en debate. **Revista Virtual REDESMA**. Volumen N° 5 (2). ISSN 1995-1078.



Disponible

en:

https://www.researchgate.net/publication/237704117_Construccion_del_riesgo_desastre_y_gestion_ambiental_urbana_Perspectivas_en_debate

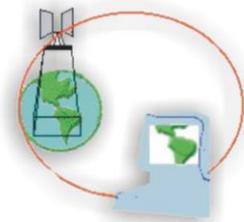
- HERZER, H.; RODRÍGUEZ, C.; CELIS, A.; BARTOLOMÉ, M. Y CAPUTO, G. (2002). Convivir con el riesgo o la gestión del riesgo. **Revista LA RED**.

Disponible

en:

https://www.researchgate.net/publication/237638971_CONVIVIR_CON_EL_RIESGO_O_LA_GESTION_DEL_RIESGO1

- JACINTO, G.; GUERRERO, E.; CORIA, D. (2007). Historia ambiental del manejo de los Recursos Hídricos en la ciudad de Tandil. Abordaje preliminar.6ta. **Bienal del Coloquio de Transformaciones Territoriales. Escenarios prospectivos acerca del desarrollo del territorio. Una reflexión estratégica**. Santa Fe, Argentina. 11 pp.
- LAN, D. (2011). Territorio, industria, trabajo: División territorial del trabajo y espacio producido en la industria de la ciudad de Tandil – Argentina. **Tesis de doctorado en Geografía**. Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación. 370 pp. Disponible en: <https://www.memoria.fahce.unlp.edu.ar/tesis/te.430/te.430.pdf>
- LAN, D.; LINARES, S.; DI NUCCI, J.; LÓPEZ PONS, M. (2010). La lógica de la organización espacial en la Ciudad de TANDIL. (ELIAS, Denise; SPOSITO, M. Encarnação B.; SOARES, Beatriz R. Org.). **Agentes Econômicos e Reestruturação Urbana e Regional: Tandil e Uberlândia**. São Paulo. Editora Expressão Popular. pp. 29-155.
- 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 de la Provincia de Buenos Aires. 90 pp.
- LA MACCHIA, M.L (2016) Simulación hidrológica y peligro de anegamiento en la ciudad de Tandil: Aportes desde las Tecnologías de la Información Geográfica. **1eras Jornadas de Hábitat y Ambiente (IHAM)**. Universidad Nacional de Mar del Plata. Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño. Mar del Plata. ISBN 978-987-544-768-4.



- LA MACCHIA, M.L. (2021). Gestión del riesgo y modelización mediante TIG: Escenarios de aplicación para la cuenca urbana de la ciudad de Tandil, Buenos Aires, Argentina. **XVIII Encuentro de Geografías de América Latina (EGAL) “Construyendo saberes emancipatorios desde y para los territorios” y VIII Congreso Nacional de Geografía de Universidades Públicas**. República Argentina. Modalidad virtual.
- 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**. Universidad Nacional de Cuyo (UNCUYO). 20 pp. Disponible en: <https://revistas.uncu.edu.ar/ojs3/index.php/beg/issue/view/numero115>.
- LINARES, S. (2007). Aplicación de sistemas de información geográfica al estudio de la segregación socioespacial urbana: el caso de la ciudad de Tandil. **Tesis de la Maestría en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica**. Facultad de Agronomía. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. 158 pp.
- LINARES, S. (2012). Análisis y Modelización de la Segregación Socioespacial en Ciudades Medias Bonaerenses mediante Sistemas de Información Geográfica: Olavarría, Pergamino Y Tandil (1991 - 2001). **Tesis de doctorado de Geografía**. Departamento de Geografía y Turismo. UNS. Bahía Blanca. Bs.As. 301 pp.
- LINARES, S.; LAN, D. (2006). Estudio de la segregación urbana mediante el uso de SIG: un aporte geográfico a la gestión municipal de Tandil, Argentina. En Erba Diego (org.); **Sistemas de Información Geográfica aplicados a estudios urbanos**. Lincoln Institute of Land policy, Cambirdge, USA. Capitulo 19, p. 195-207. Disponible en: https://www.lincolninst.edu/sites/default/files/pubfiles/sistemas-de-informacion-geografica-estudios-urbanos-full_0.pdf
- LINARES, S.; TISNES, A. (2011). Extracción y análisis de superficies urbanas construidas empleando imágenes LANDSAT 5 (TM). **I Congreso Nacional de Tecnologías de la información Geográfica y IV Reunión de Usuarios de Tecnologías de la Información Geográfica del NEA**. Laboratorio de



Tecnologías de la Información Geográfica. Facultad de Humanidades, Resistencia, Chaco, 2011. Disponible en:

<https://www.researchgate.net/publication/326693361>

- LINARES, S (coord); TISNES, A; BUZAI, G.; ROSSO, I; CELEMÍN, J.P; LA MACCHIA, M.L; ORTMANN, M.; PICONE, N. (2016). **Soluciones espaciales a problemas sociales urbanos. Aplicaciones de Tecnologías de la Información Geográfica a la planificación y gestión municipal.** ISBN 978-950-658-392-7. 177pp. Disponible en: https://igehcs.conicet.gov.ar/wp-content/uploads/sites/104/2019/07/Soluciones_espaciales_problemas_sociales_urbanos-1.pdf
- 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 **Urban Remote Sensing**. Second Edition. Remote Sensing Applications, edited by Qihao Weng, Dale Quattrochi, and Paolo E. Gamba. Indiana State University. Terre Haute, Indiana, U.S.A. Disponible en: <https://www.taylorfrancis.com/books/9780429888564>
- LLORENTE, I; DÍEZ HERRERO, A.; LAÍN HUERTA, L. (2009). Aplicaciones de los SIG al análisis y gestión del riesgo de inundaciones: avances recientes. **I Jornadas técnicas SIGTEFOR**. Sociedad Española de Ciencias Forestales. pp. 29-37. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4245445>
- MALDONADO, G; COCCARO, J. M. (2011). Esquema teórico para el estudio de la vulnerabilidad socio-territorial a inundaciones en ámbitos rurales. **Revista Geográfica Venezolana**, Volumen N° 52(2). pp. 81-100.
- MALDONADO, G. (2013). Sobre los distintos abordajes al estudio del riesgo y su dimensión ética. **Revista Reflexiones Geográficas** Volumen N° 14 (14). Universidad Nacional de Río Cuarto. pp 66-77. Disponible en: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/23695?show=full>
- MARCOS, M. (2008). Cambios en el sistema de asentamiento de la población (Región Pampeana, 1970-2001). **IX Jornadas de la Asociación de Estudios de Población de la Argentina (AEPA)** Córdoba. CD. 21 pp.



- MELESSE, A.; WANG, X. (2007). Impervious Surface Area Dynamics and Storm Runoff Response. **Remote Sensing of Impervious Surfaces**. pp. 369-384.
- MERZ, B.; THIEKEN, A.; GOCHT M. (2007). Flood Risk Mapping at the Local Scale: Concepts and Challenges. En: **Flood Risk Management in Europe**. pp.231-251. Disponible en:
https://www.researchgate.net/publication/226038430_Flood_Risk_Mapping_At_The_Local_Scale_Concepts_and_Challenges
- MIGUELTORENA ALEJANDRO (2011). Proceso de urbanización y vivienda en la configuración territorial de la ciudad de Tandil. **Tesis de Licenciatura en Geografía**. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Facultad De Ciencias Humanas. 104 pp.
- MOLERO MELGAREJO, E. (2012). La modelización hidrológica-hidráulica y los sistemas de información geográfica. **Guía Nueva Cultura del Agua. Una guía de referencia y consulta sobre la gestión y la conservación de los recursos hídricos**. Disponible en:
https://www.researchgate.net/publication/236021860_La_Modelizacion_hidrologico-hidraulica_y_los_Sistemas_de_Informacion_Geografica
- MORAD, M.; TRIVIÑO PÉREZ, A. (2001). Sistemas de Información Geográfica y Modelizaciones Hidrológicas: Una aproximación a las ventajas y dificultades de su aplicación. **Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles. A.G.E.** Volumen N° 31. pp. 23-46. Disponible en:
https://www.researchgate.net/publication/28081107_Sistemas_de_informacion_geografica_y_modelizaciones_hidrologicas_Una_aproximacion_a_lasventajas_y_dificultades_de_su_aplicacion
- MORALES HERNÁNDEZ, M.; GARCIA NAVARRO, P.; BURGUETE, J.; BRUFAU, P. (2013). A conservative strategy to couple 1D and 2D models for shallow water flow simulation. **Computers & Fluids**. Volumen N° 81. pp. 26-44. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045793013001217>
- MORENO JIMÉNEZ, A. (2010). GeoFocus: diez años en el camino hacia la sociedad de la geoinformación. **GeoFocus** (Editorial). Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica. Volumen N° 10, pp. 1-6.



ISSN: 1578-5157. Disponible en:

<https://geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/188/0>

- MORENO JIMÉNEZ, A. (2010). Justicia ambiental. Del concepto a la aplicación en planificación y análisis de políticas territoriales. **SCRIPTA NOVA**. Revista electrónica de geografía y ciencias sociales. Universidad de Barcelona. ISSN: 1138-9788. Depósito legal: b. 21.741-98. Volumen N° 14 (316). Disponible en: <http://www.ub.edu/geocrit/sn/sn-316.html>
- MURILLO, J.; GARCIA NAVARRO, P. (2010). Weak solutions for partial differential equations with source terms: Application to the shallow water equations. **Journal of Computational Physics**. Volumen N° 229 (11). pp. 4327-4368. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021999110000896>
- NANÍA, L. S.; MOLERO, E. (2007). Manual básico de HEC-RAS 3.1.3 y HEC-GeoRAS 3.1.1. **Curso de especialización: Modelación de ríos con HECRAS y SIG: Régimen permanente 1-D**. Área de Ingeniería Hidráulica, Área de Urbanismo y Ordenación del Territorio. Universidad de Granada. 59 pp.
- NATENZON, C.; TSAKOUGMAKOS, P.; ESCOLAR, M. (1988). Algunos límites ideológicos, conceptuales, y económicos del discurso ecológico-ambiental. Aportes para el estudio del espacio socioeconómico. L.Yanes y A.M.Liberali, (comp.). **Aportes para el Estudio del Espacio Socioeconómico II**. El Coloquio. Buenos Aires. pp.182-201.
- NATENZON, C. (1995). **Catástrofes naturales, riesgo e incertidumbre**. Serie documentos e informes de investigación. Volumen N° 197. FLACSO. Buenos Aires. 21 pp.
- NATENZON, C. (1998). **Riesgo, vulnerabilidad e incertidumbre. Desastres por inundaciones en Argentina**. PIRNA. Facultad de Filosofía y Letras. UBA. 16 pp.
- NEAL, J.; SCHUMANN, G.; BATES, P. (2012). Un modelo de canal de subred para simular la hidráulica del río y la inundación de llanuras aluviales en áreas grandes y con escasez de datos. Volumen N° 48 (11). **Water Resources Research**. 16 pp. Disponible en: <https://research-information.bris.ac.uk/en/publications/a-subgrid-channel-model-for-simulating-river-hydraulics-and-flood>



- OCHOA GARCÍA, S. A., REYNA, T., REYNA, S., GARCÍA, M., PATALANO, A., LABAQUE, M. (2016). Evaluación de modelos hidrodinámicos para representar flujos en cauces naturales. Revista científica **Maskana**, Volumen N° 5. pp. 83–95. Disponible en:
<https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/maskana/article/view/556>
- OLAYA, V. (2012). Geomorfología y Análisis del terreno. **Sistemas de Información Geográfica. Creative Common Atribucion**. Tomo I. pp.329-375.
- PASCUAL AGUILAR, J.; DÍAZ MARTÍN, M. (2016). Guía práctica sobre la modelización hidrológica y el modelo HEC-HMS. **Serie: Cuadernos de Geomática 4**. Centro para el Conocimiento del Paisaje. CIVILSCAPE. Instituto IMDEA Agua. Alcalá de Henares. ISBN: 978-84-617-7002-1. 155 pp. Disponible en:https://www.agua.imdea.org/sites/default/files/pdf/news/20161215/Cuadernos%20de%20Geoma%CC%81tica%204_b.pdf
- PELL, T.; LI, J.Y.Q.; JOYCE, K.E (2022). Demystifying the Differences between Structure-from-Motion Software Packages for Pre-Processing Drone Data. Drones. Volumen N° 6 (1). Disponible en:
<https://doi.org/10.3390/drones6010024>
- PÉREZ JHONNY I.; ESCOBAR JAIRO R.; FRAGOZO JOSE M. (2018). Modelación Hidráulica 2D de Inundaciones en Regiones con Escasez de Datos. El Caso del Delta del Río Ranchería, Riohacha-Colombia. **Información Tecnológica**. Volumen N° 29 (4). pp. 143-156.
Disponible en:
https://www.academia.edu/49118412/Modelaci%C3%B3n_Hidr%C3%A1ulica_2D_de_Inundaciones_en_Regiones_con_Escasez_de_Datos_El_Caso_del_Delta_del_R%C3%ADo_Rancher%C3%ADa_Riohacha_Colombia?email_work_card=title
- 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. Buenos Aires**: Editorial Dunken. pp13-26.
- PEREZ, S.; SIERRA, E.; MOMO, F.; MASOBRIO, M. (2015). Cambios en la Precipitación Promedio Anual en la Región Pampeana Argentina y sus Posibles Causas. **Revista Clima MDPI journals**. Volumen N° 3. Número Especial



Cambios en la Precipitación e Impactos en los Recursos Hídricos Regionales.

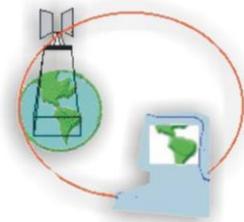
Disponible en: <https://www.mdpi.com/2225-1154/3/1/150/htm>

- PERRY, R.; MONTIEL, M. (1996). Conceptualizando riesgo en para desastres sociales. **Predicciones, Pronósticos, Alertas y Respuestas Sociales. Revista semestral de la red de estudios sociales en prevención de desastres en América Latina (LA RED)**. Volumen N° 6 (4). 9 pp.
- PICONE, N.; LINARES, S. (2014). Propuesta metodológica para la extracción y análisis de densidades urbanas mediante teledetección y SIG. Caso de estudio: ciudad de Tandil, Argentina. **Revista Universitaria de Geografía**. Volumen N° 1 (2). pp 77-96.
- PICONE, N. (2014). Clima urbano de la ciudad de Tandil. **Tesis de Doctorado en Geografía**. Departamento de Geografía y Turismo. UNS. 147 pp.
- PRINCIPI, N. (2020). Análisis socioespacial y modelización prospectiva del contexto de riesgo por inundaciones en la ciudad de Luján (Buenos Aires, Argentina) 2010-2030. **Tesis doctoral en Geografía**. Universidad Nacional de Sur. Bahía Blanca. Resumen de tesis. 9 pp. Disponible en: <https://repositoriodigital.uns.edu.ar/bitstream/handle/123456789/5560/PRINCIPI%20N%20CTesis%20Parcial.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- PUSINERI, G.; PEDRAZA, R.; LOZECO, C. (2005). Uso de Modelos digitales de elevación y de Sistemas de Información Geográfica en la modelización hidrológica. **Revista Geográfica Digital**. Instituto de Geografía. Facultad de Humanidades. Universidad Nacional del Nordeste (UNNE). Volumen N°4 (2). 8pp. Disponible en: <https://revistas.unne.edu.ar/index.php/geo/article/view/2664>
- RODRIGUES, A. M. (1998). **Producción y Consumo del Espacio. Problemática Ambiental Urbana**. Ed. HUCITEC San Pablo. 239 pp.
- RENN, O. (1992). Concepts of Risk: A Classification. Krinsky, S. y Golding, D. (Ed). **Social Theories of Risk**. PRAEGER. Londres. pp. 53-79. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/309010237_Concepts_of_risk_A_classification
- RENTERÍA J.; STENTA, H. (2003). Desarrollo de soporte computacional interactivo para sistema de simulación hidrológica superficial. **Tesis de Grado**

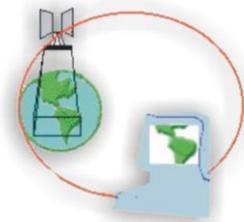


Ingeniería Civil. Facultad de Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario. Rosario, Argentina. Inédito.

- RICCARDI, G. (2000). Cell model for hydraulic modeling. **Journal of Environmental Hydrology**. Volumen N° 8. 1-13.
- RINALDI, P.; D'AMATO, J.; LARRABIDE, I. (2019). Drone based DSM reconstruction for flood simulations in small areas: a pilot study. World Conference on Information Systems and Technologies. WorldCIST'19. **New Knowledge in Information Systems and Technologies**. pp 758-764. Disponible en:
https://www.researchgate.net/publication/332023380_Drone_Based_DSM_Reconstruction_for_Flood_Simulations_in_Small_Areas_A_Pilot_Study
- RODRIGUEZ, E.; ROSA, S.; SALINAS, B. (2008). Levantamiento topobatimétrico de la zona del Lago del Fuerte (Tandil) para apoyo de obras de saneamiento. Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ingeniería. Departamento de Agrimensura. **Trabajo final**. 207p. Disponible en:
<http://200.5.74.242/greenstone/collect/facagr/index/assoc/HASHca39.dir/doc.pdf>
- RUIZ DE GALARRETA, A.; BANDA NORIEGA, R. (2005). Geohidrología y evaluación de nitratos del Partido de Tandil, Buenos Aires, Argentina. **IV Congreso Argentino de Hidrogeología y II Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de la Hidrología Subterránea**. pp. 99-108. Río Cuarto.
- RUIZ DE GALARRETA, V. A.; BANDA NORIEGA, R.; NAJLE, R.; RODRIGUEZ, C.; BARRANQUERO, R. DÍAZ, A.; MIGUEL, R.; PEREYRA, M.; PRIANO, M.E. (2013). Análisis de la calidad del agua del Arroyo Langueyú, Tandil, Buenos Aires. Centro de Investigaciones y Estudios Ambientales. **Estudios Ambientales**. Volumen N°1 (12). pp. 2-28.
- SÁNCHEZ MARTÍNEZ, F.; LASTRA FERNÁNDEZ, J. (2011). **Guía metodológica para el desarrollo del sistema nacional de Cartografía de zonas inundables**. (Coord.). Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Madrid. 324 pp. Disponible en:
https://www.miteco.gob.es/es/agua/publicaciones/guia_snczi_baja_optimizada_tcm30-422920.pdf



- SCIOLI, C. (2009). Modelación del escurrimiento superficial en áreas de llanura: Implementación y calibración de un modelo distribuido de grilla. **Tesis de maestría en Recursos Hídricos en zonas de llanura**. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional del Rosario. 127 pp.
- SCOTTISH ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY (SEPA). (2019). **Towards improved surface water flood forecasts for Scotland: A review of UK and international operational and emerging capabilities**. University of Strathclyde. Glasgow. pp. 1 – 63.
- SIERRA, E. (2006). Tendencias del régimen de precipitación y el manejo sustentable de los agroecosistemas: estudio de un caso en el noroeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. **Revista de climatología**. Volumen N° 6. ISSN 1578-8768. 12 pp. Disponible en:
https://www.researchgate.net/publication/26518882_Tendencias_del_regimen_de_precipitacion_y_el_manejo_sustentable_de_los_agroecosistemas_estudio_de_un_caso_en_el_noroeste_de_la_provincia_de_Buenos_Aires_Argentina
- SMITH, G.; WASKO, C. (2012). **Australian rainfall and runoff revision Project 15: Two dimensional simulations in urban areas. Representation of buildings in 2d numerical flood models**. Engineers Australia. Water Research Laboratory. University of New South Wales. 94 pp.
- SMITH G.; DAVEY E.; COX R. (2014). **Flood Hazard**. Technical report 2014/07. Water Research Laboratory. University of New South Wales. Sydney.
- STENTA, H.; RICCARDI, G.; BASILE, P. (2007). Comparación de respuestas hidrológicas aplicando un modelo matemático distribuido para diferente tamaño de grilla. **XXI Congreso Nacional del Agua**. Tucumán. Argentina. 10 pp.
- TENG, J.; JAKEMAN, A.; VAZE, J.; CROKE, B.; DUTTA, D.; KIMA, S. (2017). Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. **Environmental Modelling and Software**. 16 pp.
- TRIVIÑO PÉREZ, A.; ORTIZ ROJAS, S. (2004). Metodología para la modelación distribuida de la escorrentía superficial y la delimitación de zonas inundables en ramblas y ríos-rambla mediterráneos. **Investigaciones Geográficas**. Volumen N° 35. Instituto Universitario de Geografía Universidad de Alicante. pp. 67-83. Disponible en:



<https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/291/3/Trivi%c3%b1o%20Perez-Metodologia%20para%20la%20modelacion.pdf>

- TUCCI, C. (2007). **Gestión de Inundaciones Urbanas**. Instituto de Pesquisas Hidráulicas de la Universidade Federal do Rio Grande do Sul. IHP/UFRGS Associação Brasileira de Recursos Hídricos. ABRH. 317 pp. Disponible en: https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/gestion-de-inundaciones/gestion-de-inundaciones-urbanas-esp.pdf
- VALENZUELA, M.C. (1999). Amenazas de origen climático que pueden desencadenar situaciones de riesgo en la ciudad de Río Cuarto, Argentina. **En CRONIA. Revista de Investigación de la Facultad de Ciencias Humanas**. Volumen N° 3 (2). Universidad Nacional de Río Cuarto. 20 pp.
- VAPÑARSKY, C.; GOROJOVSKY, N. (1990). **El Crecimiento Urbano en la Argentina**. Buenos Aires, Grupo Editor Latinoamericano-IIED. 159 pp.
- VELÁZQUEZ, G.; CELEMÍN, J. P.; LINARES, S. TISNES, A.; MANZANO, F. MIKKELSEN, C. y LA MACCHIA, M.L (2020). Análisis según radios censales. **En Atlas Histórico y Geográfico de la Argentina**. Calidad de vida I. Instituto de Geografía, Historia y Ciencias Sociales CONICET/UNCPBA Tandil - 2020. ISBN 978-950-658-522-8. Disponible en: <https://www.fch.unicen.edu.ar/atlashyg/atlascv1ebook.pdf>
- VELÁZQUEZ, G.; MIKKELSEN, C.; LINARES, S. y CELEMÍN, J. P. (2014). **Calidad de vida en argentina. Ranking del bienestar por departamentos (2010)**. ISBN: 978-950-658-356-9. Centro de Investigación Geográficas - Instituto de Geografía, Historia y Ciencias Sociales, CONICET/UNCPBA. Tandil, Argentina. 164 pp. Disponible en: <https://igehcs.conicet.gov.ar/wp-content/uploads/sites/104/2019/07/Rankingicv2010.pdf>
- 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**. Volumen N° 27 (2) pp. 109-136. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/cein/v27n2/0124-8170-cein-27-02-00109.pdf>
- WENG, Q. (2001). Modeling Urban Growth. Effects on Surface Runoff with the Integration of Remote Sensing and GIS. **Environmental Management**.



Volumen N° 28 (6). pp. 737–748. Springer-Verlag New York Inc. Disponible en:

<https://www.researchgate.net/publication/225601804>

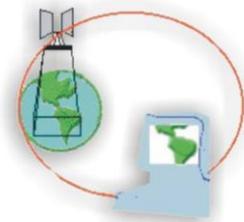
- VILLANUEVA, I. (1999). Estudio de regímenes transitorios y permanentes en ríos y canales. **Tesis doctoral**. Universidad de Zaragoza. 264 pp.
- VILLAREAL, M. C. (2020). Caracterización geotécnica de macizos rocosos, a nivel de prefactibilidad, en el área de implantación de presas de laminación de crecidas extraordinarias actuales y proyectadas sitas en la Hoja Tandil 3760-IV. **Trabajo Final de la Licenciatura en Geología**. Universidad Nacional de La Plata Facultad de Ciencias Naturales y Museo. 95 pp. Disponible en: http://naturalis.fcnym.unlp.edu.ar/repositorio/documentos/tesis/tfl_mcristinavillarreal.pdf
- WENG, Q. (2010). Una evaluación SIG de teledetección de la expansión urbana y su impacto en la temperatura de la superficie en el delta del Zhujiang, China. **Revista Internacional de Teledetección**. Volumen N°22. pp. 999-2014.
- WENG, Q. 2010. **Remote Sensing and GIS Integration: Theory, Methods, and Applications**. The McGraw-Hill Companies, EE.UU. 416 pp.
- XU, CHONG-YU (2002). **Hydrologic Models**. Villavägen Sweden: Uppsala University. Department of Earth Sciences Hydrology. Disponible en: <https://cupdf.com/document/hydrologic-models.html?page=3>

Fuentes web utilizadas

- ABELLÁN, A (2016). <https://www.iagua.es/blogs/ana-abellan/impactos-urbanizacion-ciclo-agua>
- ANIDA. Atlas Nacional interactivo de la Argentina. Sección Hidrografía. Aguas superficiales Disponible en: <https://ide.ign.gov.ar/portal/apps/MapJournal/index.html?appid=9afbdc4af82412d9a7657168198e5f3>
- ARCGIS HELP LIBRARY. Software: ArcGIS [software GIS]. Versión 10.0. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute, Inc., 2010. <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-desktop/resources>
<https://desktop.arcgis.com/>



- Atlas de cuencas y regiones hídricas ambientales de la provincia de Buenos Aires. Etapa I. <https://www.minfra.gba.gov.ar/web/Hidraulica/Atlas.pdf>
- Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas de la Argentina. INDEC, (2010): <https://www.indec.gob.ar/>
- Consejo Hídrico Federal (COHIFE). Disponible en: <https://cohife-cohife.hub.arcgis.com/>
- DE GRANDE, P.; GUTIÉRREZ, A. (2021). Entorno urbano, 2001-2010. Recuperado el 27 de enero, 2022, de <https://mapa.poblaciones.org/map/83301> Poblaciones. Plataforma abierta de datos espaciales de población de la Argentina. Disponible en: <https://mapa.poblaciones.org/map/3701/#/@-37.333296,-59.174066,13z&r19166!l=12201!v2!a3!w0,0,0,0,0,0/f=f874569!!12201!v35701>
- DJI Phantom 4 Advance: <https://www.dji.com/phantom-4-adv/info>
- GARCÍA J. (2021). Sistemas de Inteligencia Artificial aplicados a procesos agrícolas. Boletín Nosolosig. Compartiendo información sobre geotecnologías. Disponible en: <https://www.nosolosig.com/articulos/1220-sistemas-de-inteligencia-artificial-aplicados-a-procesos-agricolas>
- IIAMA (Instituto Universitario de Investigación de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente): <https://www.iiama.upv.es/iiama/es/investigacion/lineas-de-investigacion.html#modelación-de-la-calidad-de-aguas-superficiales>
- Instituto Nacional del Agua (INA). Subsecretaría de Recursos Hídricos (2002). Atlas digital de los recursos hídricos y aguas superficiales de la República Argentina.
- Infraestructura de datos espaciales (IDE): Infraestructura y servicios públicos: <https://www.gba.gov.ar/infraestructura/>
- Infraestructura de datos espaciales. IDE Tandil: <http://mapa.tandil.gov.ar>
- Infraestructura de datos espaciales. IDE Valencia: <https://visor.gva.es/visor/>
https://geocataleg.gva.es/#/results/calidad_ambiental
<https://sig.mapama.gob.es/snczi/>
- Instituto Geográfico Nacional (IGN): Relevamiento de información de Geodesia y nivelación: <https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/InformacionGeoespacial/CapasSIG>
<https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Nivelacion/Mapa>



- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). (2014). Sistema de Información Clima y Agua. Disponible en Fase climática y situación del fenómeno ENSO: <http://climayaqua.inta.gob.ar/>
<https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/manualinundaciones.pdf>
- JOVANOVIĆ, O. (2014). Inundación y complejidad en La Plata. La lluvia no asesinó a nadie, la ciudad sí. Ambiente y Política de las ciudades. Año 13 / Número 138-139 / Abril-Mayo 2014 / ISSN 2346-9080. REVISTA DIGITAL. Disponible en: https://cafedelasciudades.com.ar/ambiente_138.htm
- La voz de Tandil. Fecha de consulta: 09/08/2021. Disponible en: <https://www.lavozdetandil.com.ar/2021/08/09/el-dique-de-tandil--obra-maestra-de-la-ingenieria-hidraulica>
- Modelos Digitales de Elevación (DEM): <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/#>
<https://gisgeography.com/dem-dsm-dtm-differences/>
<http://gisresources.com/confused-dem-dtm-dsm/>
- Modelos urbanos y físicos mediante SIG: <https://alfageomatics.com/2019/05/tecnicas-de-observacion-de-la-tierra-iv-sistemas-de-informacion-geografica-gis/>
- Plan de desarrollo territorial de la ciudad de Tandil (PDT) 2005. Actualización de normativa 2022. Disponible en: https://autogestion.tandil.gov.ar/apex/f?p=102:13:::::CAT_DOC:201
- Precenso de viviendas 2020: <https://precensodeviviendas.indec.gob.ar/>
- Registros pluviométricos: <https://www.wunderground.com/wundermap>
<https://www.wunderground.com/dashboard/pws/ITANDI12>
<https://www.wunderground.com/dashboard/pws/ITANDI2>
<https://www.wunderground.com/dashboard/pws/ITANDI5>
<https://www.wunderground.com/dashboard/pws/IBUENOSA248>
<https://www.netatmo.com/es-es/weather/weatherstation>
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN): <https://www.smn.gob.ar/descarga-de-datos>
<https://www.smn.gob.ar/descarga-de-datos>
- Sistema de Información Geográfica de Infraestructura de Obras y Servicios Públicos. (GEOINFRA).
<https://www.minfra.gba.gob.ar/planificacion/geoinfra2/publico/>



Acceso restringido 2023.

- VILLANUEVA, I. (2022). Welcome to Flood-Mapping documentation. Disponible en: <https://floodmapping.readthedocs.io/>