



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

Maestría en Ecohidrología

Tesis de maestría de Ecohidrología

Para la obtención del título de

Magíster en Ecohidrología

CARACTERIZACIÓN DEL IMPACTO POR INUNDACIÓN EN UNA CUENCA URBANA

Autor: Lic. Nicolás Ortiz

Director: Ing. Mag. Mariano Re

Colaborador: Ing. Marcos Cipponeri

La Plata, Buenos Aires, 01 de abril de 2020

RESUMEN

Las inundaciones urbanas representan los eventos que mayores impactos producen sobre la población y el medio físico construido en la Región Metropolitana de Buenos Aires (RMBA), las cuales contemplan una dinámica compleja dependiente de la relación entre múltiples variables causales.

De manera general, en cuencas urbanas de Argentina, se produce un avance de la urbanización informal sobre cursos de agua lo cual es acompañado por la ausencia en el desarrollo de sistemas de gestión de residuos y servicios públicos adecuados, situación que agrava las consecuencias producidas por eventos de inundación.

El desarrollo del trabajo se concentró en la cuenca Sarandí – Santo Domingo ubicada en la RMBA, la cual se encuentra altamente antropizada, presenta eventos de inundaciones recurrentes, condiciones de alta vulnerabilidad social y múltiples problemas ambientales.

Esto permitió realizar una caracterización en detalle de la amenaza ante eventos de inundación de diferente magnitud e interrelacionar esta información con la vulnerabilidad presente en la cuenca de estudio.

Para ello se procedió al desarrollo, calibración, validación y explotación del modelo hidrológico e hidráulico EPA - SWMM, el cual se complementó con la instalación de instrumental hidrométrico en el territorio para el logro de los objetivos. De esta forma se pudieron obtener niveles y velocidades máximas de agua en calles con su respectiva distribución espacial y temporal ante la ocurrencia de eventos de precipitación extremos extraordinarios y ordinarios. Esta información se cruzó con indicadores de vulnerabilidad con el fin de avanzar en la cuantificación de impactos producidos por eventos de inundación. A su vez, se analizaron los cambios hidrológicos producidos por modificaciones en la urbanización de partidos y expansión de actividades productivas.

Se elaboró una metodología para la cuantificación de los impactos producidos por eventos de inundación, lo cual permitió una mejor comprensión de la dinámica de inundaciones urbanas en el territorio y las consecuencias potenciales producidas por eventos extremos extraordinarios de precipitación, resultando una herramienta de suma importancia para la toma de decisiones políticas y el desarrollo de planes de mitigación.

ABSTRACT

Urban floods represent the events that have the greatest impact on the population and the physical environment built in the Metropolitan Region of Buenos Aires (RMBA), which contemplate a complex dynamic depending on the relationship between multiple causal variables.

In general, in urban watersheds, there is an advance of informal urbanizations on water courses which are accompanied by the absence in the development of appropriate waste management systems and public services, a situation that aggravates the consequences produced by flooding events.

This work makes focus in the Sarandi - Santo Domingo basin, located in the RMBA. This basin is highly anthropized, presents recurrent flood events, conditions of high social vulnerability and multiple environmental problems.

Thus, research carried out there has enabled to develop a detailed characterization of the threat of flooding events of different magnitude and to relate this information with the vulnerability present in this basin.

For this purpose, the EPA - SWMM hydrological and hydraulic model was developed, calibrated, validated and exploited, this was complemented by the installation of hydrometric instruments in the territory to achieve the objectives. In this way, maximum water levels and velocities on streets with their respective spatial and temporal distribution before the occurrence of extraordinary and ordinary precipitation events. This information was crossed with vulnerability indicators in order to advance in the quantification of impacts produced by flood events. In turn, the hydrological changes produced by modifications in the urbanization of districts and expansion of productive activities were analyzed.

A methodology was developed for the quantification of the impacts produced by flood events, which allows a better understanding of the dynamics of urban flooding in the territory and the potential consequences produced by extraordinary events, resulting in a very important tool for political decision making and the development of mitigation plans.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres María y Ángel quienes estuvieron apoyándome en todo el periodo de formación como profesional.

A mi director Mariano Re quien con su apoyo constante y dedicación, junto con los compañeros del Programa de Hidráulica Computacional del INA, me brindaron los medios y la experiencia para llevarlo adelante.

ÍNDICE GENERAL

1.- INTRODUCCIÓN	11
1.1.- Planteo del problema	11
1.2.- Objetivos	12
2.- MARCO TEÓRICO	13
2.1.- Eventos de precipitación extremos.....	13
2.2.- Inundaciones urbanas	14
2.2.1.- Amenaza en inundaciones urbanas.....	14
2.2.2.- Vulnerabilidad en inundaciones urbanas	15
2.2.3.- Impacto en inundaciones urbanas.....	16
2.3.- Modelación hidrológica – hidráulica.....	16
2.4.- Sistemas de información geográfica.....	18
2.4.1.- Teledetección	19
2.4.2.- Bases de datos.....	20
2.5.- Hidrometría	21
3.- MATERIALES Y MÉTODOS	23
3.1.- Características generales de la RMBA	23
3.1.2.- Clima.....	24
3.1.2.1.- Sudestadas	29
3.1.3.- Hidrología.....	30
3.1.4.- Geomorfología.....	31
3.1.5.- Condiciones ambientales	32
3.1.6.- Aspectos socioeconómicos	34
3.2.- Cuenca Sarandí - Santo Domingo.....	35
3.2.1.- Subcuenca Sarandí.....	37
3.2.2.- Subcuenca Santo Domingo	37
3.2.3.- Cambios en el ambiente urbano.....	39
3.3.- Modelación hidrológica hidráulica de la cuenca Sarandí - Santo Domingo.....	40
3.3.1.- Eventos de precipitación considerados	40
3.3.2.- Implementación del modelo hidráulico – hidrológico.....	41
3.3.2.1.- Precipitaciones	44
3.3.2.2.- Modelo digital del terreno	46
3.3.2.3.- Cobertura de suelo	49
3.3.2.3.1.- Grado de urbanización	50
3.3.2.4.- Sistema dual de drenaje	55
3.3.3.- Calibración	57
3.3.3.1.- Indicadores de performance	62
3.3.4.- Validación.....	63
3.4.- Metodología para cuantificar impactos por eventos de inundación.....	66
3.4.1.- Amenaza por inundaciones urbanas	70
3.4.2.- Caracterización de vulnerabilidad.....	71
3.4.3.- Impacto social por eventos extremos	74
3.4.4.- Impacto hidrológico por urbanización	77
3.4.5.- Impacto hidrológico por actividad productiva	78
4.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN	80
4.1.- Amenaza por inundaciones urbanas	80

Caracterización del impacto por inundación en una cuenca urbana

4.1.1.- Niveles máximos en calles	80
4.1.2.- Velocidades máximas en calles.....	82
4.1.3.- Permanencia del agua.....	87
4.1.4.- Niveles de severidad	90
4.2.- Impacto social por eventos extremos	91
4.3.- Impacto hidrológico por urbanización	98
4.3.1.- Escenario I	98
4.3.2.- Escenario II	101
4.4.- Impacto hidrológico por actividad productiva	104
5.- CONCLUSIONES.....	107
6.- BIBLIOGRAFÍA.....	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Elementos hidrológicos e hidráulicos utilizados en EPA - SWMM.	18
Figura 2.- Estaciones hidrológicas a nivel nacional (izquierda) y en la RMBA (derecha). Fuente: Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica, 2019.	21
Figura 3.- Instrumental hidrométrico instalado.	22
Figura 4.- Región Metropolitana de Buenos Aires.	24
Figura 5.- Precipitación anual en Argentina, periodo 1961 – 2010 (izquierda) y tendencia de precipitación, periodo 1961 – 2016 (derecha). Fuente: Servicio Meteorológico Nacional.	25
Figura 6.- Ubicación estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional.	26
Figura 7.- Precipitación media mensual en Observatorio Central Buenos Aires y Ezeiza Aero. Serie 1961-2018.	26
Figura 8.- Precipitación máxima mensual y máxima diaria. Observatorio Central Buenos Aires 1961-2018. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional.	27
Figura 9.- Precipitación máxima mensual y máxima diaria. Estación Ezeiza Aero 1961 – 2018. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional.	27
Figura 10.- Evolución días con lluvia por año.	29
Figura 11.- Cuencas Luján, Escobar, Reconquista, Medrano, Vega, Maldonado, Matanza – Riachuelo y vertientes al Río de la Plata.	31
Figura 12.- Geomorfología del AMBA. Fuente: SEGEMAR.	32
Figura 13.- Cuenca Sarandí – Santo Domingo.	36
Figura 14.- Cambio en el balance hidrológico de una cuenca urbana.	39
Figura 15.- Presencia de residuos sólidos urbanos, arroyo San Francisco.	40
Figura 16.- Eventos de precipitación estudiados.	41
Figura 17.- Software de pre y post procesamiento ConuPy.	42
Figura 18.- Esquema de modelación.	43
Figura 19.- Instrumental hidrométrico utilizado.	45
Figura 20.- Valores acumulados de precipitación del evento del día 28 de abril de 2018.	46
Figura 21.- Extracción de curva de nivel principal para una cota de 17.50 y 8.75 m respectivamente, a partir de la nube de puntos.	47
Figura 22.- Comparativa curvas de nivel IGN (rojo) y vuelo fotogramétrico (verde) para cota de 6.25m.	47
Figura 23.- MDT construido a partir de curvas de nivel IGN (izquierda). MDT construido a partir de vuelo fotogramétrico (derecha).	48
Figura 24.- Raster modelo digital del terreno generado.	48
Figura 25.- Mapa de impermeabilidad.	49
Figura 26.- Áreas permeables e impermeables resultantes de la clasificación.	52
Figura 27.- Porcentaje de impermeabilización a lo largo del tiempo.	53
Figura 28.- Urbanización a escala de partido administrativo.	53

Figura 29 .- a)- Avance de urbanización, 2010 y 2019 respectivamente, b)- Crecimiento en vertical de asentamientos 2017 y 2019 respectivamente.	54
Figura 30 .- Sistema de drenaje cuenca Sarandí – Santo Domingo.	55
Figura 31 .- Red de calles.	56
Figura 32 .- Red de desagües pluviales.....	57
Figura 33 .- Inundación producida por el evento pluviométrico del 8, 9 y 10 de septiembre en el partido de Quilmes.	58
Figura 34 .- Pluviómetros utilizados. Evento 8, 9 y 10 de septiembre de 2017.....	58
Figura 35 .- Interpolación de la precipitación por IDW.....	59
Figura 36 .- Esguerramiento en cuencas urbanas.	61
Figura 37 .- Resultado de la calibración del modelo. Sensor arroyo Las Piedras. Estación de bombeo nº4 Barrio La Sarita, Quilmes.....	63
Figura 38 .- Series de niveles observados y simulados en el arroyo Las Piedras.....	65
Figura 39 .- Serie de nivel observado y simulado en el arroyo San Francisco. Evento 28 y 29 de abril de 2018.....	66
Figura 40 .- Puntos de referencias.....	68
Figura 41 .- Imágenes de puntos de referencia utilizados.	70
Figura 42 .- Población menor a 5 años por hectárea.....	72
Figura 43 .- Población mayor a 65 años por hectárea.....	73
Figura 44 .- Viviendas calidad insuficiente por hectárea.....	73
Figura 45 .- Población menor a 5 años por hectárea y niveles máximos de agua. Eventos extremos extraordinarios BSAS1985 (izquierda) y LP2013 (derecha).	74
Figura 46 .- Población mayor a 65 años por hectárea y niveles máximos de agua. Eventos extremos extraordinarios BSAS1985 (izquierda) y LP2013 (derecha).	75
Figura 47 .- Viviendas calidad insuficiente por hectárea y niveles máximos de agua. Eventos extremos extraordinarios BSAS1985 (izquierda) y LP2013 (derecha).	76
Figura 48 .- Establecimientos educativos (izquierda) y de salud (derecha) considerados. Fuente: IGN, 2019.	77
Figura 49 .- Predios con presencia de actividad ladrillera	79
Figura 50 .- Niveles máximos alcanzados en calle por el evento extremo extraordinario BSAS1985.	81
Figura 51 .- Niveles máximos alcanzados en calle por el evento extremo extraordinario LP2013.	81
Figura 52 .- Niveles máximos alcanzados por el evento extremo ordinario SSD2018.	82
Figura 53 .- Velocidades máximas en calles alcanzadas durante el evento extremo extraordinario BSAS1985.....	83
Figura 54 .-Velocidades máximas en calles alcanzadas durante el evento extremo extraordinario LP2013.....	84
Figura 55 .- Velocidades máximas en calles. Evento extremo extraordinario BSAS1985.....	85
Figura 56 .- Velocidades máximas en calles. Evento extremos extraordinario LP2013	86
Figura 57 .- Nivel de agua en calles en puntos de referencia establecidos. Evento extremos extraordinario LP2013.	88

Figura 58.- Nivel de agua en calles en puntos de referencia establecidos. Evento extremo extraordinario BSAS1985.....	89
Figura 59.- Nivel de seguridad SUFRI. Eventos extremos extraordinarios BSAS1985 (izquierda) y LP2013 (derecha).....	91
Figura 60.- Cuantificación de impactos. a)- Población expuesta, b)- Hogares expuestos, c)- Mayores a 65 años, d)- Menores a 5 años afectados por diferentes niveles de agua y e)- Viviendas calidad insuficiente.....	92
Figura 61.- Cuantificación de impactos por partidos. a)- Población total, b)- Hogares totales, c)- Mayores a 65 años, d)- Menores a 5 años y e)- Viviendas calidad insuficiente. Evento extremo extraordinario BSAS1985.....	93
Figura 62.- Establecimientos expuestos a eventos extremos extraordinarios. BSAS1985.....	94
Figura 63.- Cuantificación de impactos. a)- Población expuesta, b)- Hogares expuestos, c)- Mayores a 65 años, d)- Menores a 5 años afectados por diferentes niveles de agua y e)- Viviendas calidad insuficiente.....	95
Figura 64.- Cuantificación de impactos por partidos. a)- Población total, b)- Hogares totales, c)- Mayores a 65 años, d)- Menores a 5 años y e)- Viviendas calidad insuficiente. Evento extremo extraordinario LP2013.	96
Figura 65.- Establecimientos afectados por eventos extremos extraordinarios. LP2013.....	97
Figura 66.- Niveles y caudales simulados según diferentes escenarios propuestos. A - LPB. ..	99
Figura 67.- Niveles y caudales simulados según diferentes escenarios propuestos. A - SFB.	100
Figura 68.- Niveles simulados según diferentes escenarios propuestos. A - LPA.	100
Figura 69.- Niveles simulados según diferentes escenarios propuestos. A - SFA.	100
Figura 70.- Niveles simulados según diferentes escenarios propuestos. Punto de referencia 4	101
Figura 71.- Niveles simulados según diferentes escenarios propuestos. A – S.	101
Figura 72.- Niveles simulados según diferentes escenarios propuestos. A – SD.....	101
Figura 73.- Niveles simulados según diferentes escenarios propuestos. A - LPB.	102
Figura 74.- Niveles simulados según diferentes escenarios propuestos. A - SFB.	103
Figura 75.- Niveles simulados según diferentes escenarios propuestos. A - LPA.	103
Figura 76.- Niveles simulados según diferentes escenarios propuestos. A - SFA.	104
Figura 77.- Caudales simulados según diferentes escenarios propuestos. A – S.....	104
Figura 78.- Caudales simulados según diferentes escenarios propuestos. A – SD.....	104
Figura 79.- Nivel en el arroyo Las Piedras. A - LPA, escenario base y con ladrilleras.	105
Figura 80.- Nivel en el arroyo Las Piedras. A - LPB, escenario base y con ladrilleras.	105
Figura 81.- Caudal en el arroyo Sarandí. A - S, escenario base y con ladrilleras.	106
Figura 82.- Caudal en el arroyo Santo Domingo. A - SD, escenario base y con ladrilleras.....	106

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Días con lluvia promedio en estaciones OCBA y Ezeiza, serie 1961 - 2018.	28
Tabla 2.- Estimación de población en bases a datos del INDEC, 2010.....	36
Tabla 3.- Partidos ubicados en la cuenca Sarandí – Santo Domingo.	38
Tabla 4.- Estructura del modelo hidrológico – hidráulico.....	43
Tabla 5.- Pluviómetros utilizados.....	44
Tabla 6.- Imágenes satelitales utilizadas.	50
Tabla 7.- Rango de coeficiente de rugosidad n de Manning para cursos naturales y conductos cerrados.	60
Tabla 8.- Rango de valores n de rugosidad de Manning para diferentes coberturas terrestres.	60
Tabla 9.- Rango de valores de almacenamiento en depresión.	60
Tabla 10.- Rango de valores modelo de infiltración de Horton.	60
Tabla 11.- Parámetros utilizados en la modelación hidrológica – hidráulica.....	61
Tabla 12.- Indicadores de performance utilizados.....	62
Tabla 13.- Eventos de precipitación utilizados en el proceso de validación.....	63
Tabla 14.- Indicadores de performance utilizados.....	66
Tabla 15.- Resumen de variables hidrológicas para eventos extremos pluviométricos modelados.	67
Tabla 16.- Puntos de referencia utilizados.....	68
Tabla 17.- Niveles de severidad según metodología SUFRI.	71
Tabla 18.- Tiempo de permanencia de agua. Evento extremo extraordinario LP2013.	88
Tabla 19.- Tiempo de permanencia de agua. Evento extremo extraordinario BSAS1985.	89
Tabla 20.- Origen de población expuesta. Evento extremo extraordinario BSAS 1985.....	92
Tabla 21.- Establecimientos expuestos. Evento extremo extraordinario BSAS1985.....	93
Tabla 22.- Origen de la población expuesta. Evento extremo extraordinario LP2013.....	95
Tabla 23.- Establecimientos afectados. Evento extremo extraordinario LP2013.	97
Tabla 24.- Establecimientos expuestos. Evento extremo ordinario SSD2018.....	97
Tabla 25.- Balance hidrológico en diferentes escenarios.....	99
Tabla 26.- Balance hidrológico en diferentes escenarios.....	102

1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- Planteo del problema

Entre 1961 y 2010 se observaron aumentos significativos en la precipitación anual del orden del 20 % en las principales ciudades de la zona húmeda del país. Así mismo, en los últimos 30 años han ocurrido numerosos eventos adversos de distintas magnitudes y grado de impactos, que han ocasionado muertes y grandes pérdidas económicas (Fenoglio et al., 2015). Cada vez que ocurren inundaciones urbanas, un gran porcentaje de población se ve afectada y esta es una tendencia que va en aumento (Bacchiega et al., 2015).

Los fenómenos hidrometeorológicos extremos pueden contribuir a la ocurrencia de desastres, pero los riesgos de desastre no solo obedecen a riesgos físicos. Los riesgos de desastre surgen de la interacción entre fenómenos hidrometeorológicos extremos, junto con la exposición y vulnerabilidad, determinante del riesgo desde el punto de vista humano (IPCC, 2013). Por ello, la gravedad de los impactos relativos a los fenómenos hidrometeorológicos extremos posee una multicausalidad que deriva en situaciones de riesgo o en desastres cuando existe población afectada, y se producen alteraciones graves en la organización de las comunidades involucradas. Esta complejidad permite que se generen inundaciones urbanas que no solo sean producidas por eventos extremos extraordinarios, sino por la interrelación de variables de comportamiento no extremos que actúan sinérgicamente (Re et al., 2015; García Rojo et al., 2016).

La información existente indica que, en todos los países, el grado de exposición de las personas y los bienes ha aumentado con más rapidez de lo que ha disminuido la vulnerabilidad, lo que ha generado nuevos riesgos y un incremento constante de las pérdidas relacionadas con los desastres, con un considerable impacto en los ámbitos económico, social, sanitario, cultural y ambiental a corto, medio y largo plazo, en especial a nivel local y comunitario (UNISDR, 2015).

La inundación es un fenómeno emergente dentro de un sistema territorial, caracterizada por cierta recurrencia que bien puede variar en espacio y tiempo. La misma surge de la interacción propia entre medio físico y medio social en la producción de espacio geográfico. Por tanto, el estudio de su dinámica implica el análisis de dos componentes (tanto como su interacción): la dinámica de una amenaza hídrica y la dinámica de localización (y estructura interna) de las actividades económicas, los servicios y la población (Giordano et al., 2016).

Como primer paso en el abordaje de las inundaciones urbanas por parte de los gestores es necesario comprender el tipo de amenazas a la cual se puede ver expuesto un territorio, en diferentes escalas espaciales y temporales y caracterizar la dinámica hídrica que se presenta en la cuenca (niveles alcanzados, velocidad de agua, tiempo de permanencia del agua, extensión de la inundación, tiempo al pico, etc.) y analizar el medio físico en el que se desarrolla y con el cual interacciona (cantidad de población, tipos de construcciones presentes, entre otros).

Este entendimiento es esencial para diseñar medidas y propuestas de mitigación que puedan prevenir o limitar los daños de un tipo específico de inundación. Igualmente importante

es conocer dónde y con qué frecuencia es posible que ocurran inundaciones, que población y activos ocupan las áreas de potencial afectación, cuan vulnerables son las personas y sus asentamientos, como se planifican y desarrollan los asentamientos, y que están haciendo para reducir los riesgos por inundación. Esto es crítico para comprender las necesidades, urgencias y prioridades en la implementación de medidas de gestión del riesgo de inundaciones.

La caracterización de las causas de las inundaciones y los daños potenciales que pueden ocasionar es una información relevante para mitigar el impacto de inundaciones en áreas urbanas. Para ello es necesario utilizar herramientas que sean eficientes y eficaces a la hora de reproducir la dinámica espacial y temporal del evento que origina la inundación y la representación de los bienes y personas expuestos en la escala local. Por lo tanto, es necesario generar modelos numéricos calibrados y validados que representen el comportamiento de la dinámica del agua en cuencas urbanas, que combinados con el uso de sistemas de información geográfica constituyen insumos básicos para la generación de información precisa para la gestión de una inundación.

1.2.- Objetivos

En el presente trabajo se busca analizar las variables involucradas en la caracterización del impacto de inundaciones en una cuenca urbana densamente poblada y con altos niveles de vulnerabilidad, que sufre recurrentes inundaciones, para contribuir a la implementación de medidas no estructurales para la mitigación del impacto de inundaciones por parte de los distintos tomadores de decisión.

El objetivo general del trabajo es caracterizar el impacto social y físico a través de la estimación de las consecuencias potenciales generadas por eventos de precipitación.

Los objetivos específicos incluyen:

- Caracterizar la amenaza por inundaciones urbanas a través del desarrollo e implementación de un modelo hidrológico – hidráulico.
- Caracterizar la vulnerabilidad a partir del uso de indicadores relevantes.
- Cuantificar los impactos potenciales a partir del análisis de la interrelación entre amenaza y vulnerabilidad con la cual se va a generar cartografía como herramienta para la gestión de inundaciones urbanas.
- Evaluar escenarios hidrológicos ante la ocurrencia de cambios físicos producidos en la cuenca.

La hipótesis de la cual se parte es que la cuenca Sarandí - Santo Domingo se encuentra en una zona con presencia recurrente de inundaciones, presenta condiciones socioeconómicas que pueden incrementar la vulnerabilidad de la población y consecuentemente generar situaciones de riesgo con impactos negativos sobre los partidos expuestos a eventos extremos extraordinarios.

2.- MARCO TEÓRICO

2.1.- Eventos de precipitación extremos

Se puede definir a un evento meteorológico extremo como un evento raro dentro de su distribución estadística de referencia en un lugar determinado. En hidrología, se utilizan diferentes distribuciones estadísticas para la estimación de la probabilidad de ocurrencia de un evento en particular. Dado $P(X)$, la probabilidad de que un máximo anual sea igual o superior a X en cualquier año, si X es igual o superior r veces en N años (N grande), entonces $P(X) = \frac{r}{N}$. Sin embargo, el período de retorno de X es $T(X) = \frac{N}{r}$. Por lo tanto, la relación entre periodo medio de retorno y la probabilidad de ocurrencia: $P(X) = \frac{1}{T(X)}$ (Shaw, 2005; Viessman y Lewis, 2003).

Las características de una meteorología extrema varían según los lugares (IPCC, 2013). Los eventos extremos pueden también ser definidos por el impacto que el evento tiene en la sociedad. Este impacto puede implicar pérdidas de vida, pérdidas económicas o monetarias, o ambas (Easterling et al., 1999).

Es importante notar que la relación entre eventos extremos e impactos extremos no es sencilla. Un evento extremo no necesariamente implica algún daño. Más bien, los daños implícitos también dependen de la distribución de los valores, densidad de población, medidas de respuesta a emergencias, entre otros. Del mismo modo, no todos los daños causados por eventos meteorológicos o climáticos están relacionados con eventos extremos como se definió anteriormente (Zwiers et al., 2011).

Haylock et al., (2006) encontraron que el patrón de las tendencias de extremos y precipitación anual en Sudamérica durante las últimas décadas fue generalmente el mismo. Por lo tanto, dado que las precipitaciones en el sudeste de Sudamérica se incrementaron durante las últimas décadas del siglo XX (Barros et al., 2000, 2008; Liebmann et al., 2004), es posible que lo mismo ocurra con lluvias intensas (Re et al., 2009).

Según Robledo y Penalba (2008) a partir de la década del 70 diversos autores observaron aumentos en la precipitación anual en distintas regiones de la Argentina. Entre otros se puede mencionar a Barros y Mattio (1977), Hoffmann et al., (1987). Vargas (1987), Krepper et al., (1989), Castañeda y Barros (1994), Minetti y Vargas, (1997), Castañeda y Barros (2001) y Minetti et al., (2003). Estos aumentos de la precipitación anual no presentan un comportamiento espacial coherente. Por ejemplo, hacia el oeste de Argentina el mismo se evidencia como un 'salto' o discontinuidad, mientras que hacia el este y la Mesopotamia el aumento es más gradual (García y Vargas, 1998; Minetti y Vargas, 1997; Rusticucci y Penalba, 2000; Boulanger et al., 2005, Liebman et al., 2004, Penalba y Vargas 2004, Pittock, 1980). Barros et al., (2008) mostraron que los aumentos de la precipitación anual sobre la cuenca del Plata fueron debido principalmente a la precipitación en el semestre cálido (octubre a marzo). Este semestre también es el responsable de los aumentos en la cantidad de días con lluvia en términos anuales en la cuenca del Plata (Penalba y Robledo, 2010)

Dentro de la Región Metropolitana de Buenos Aires (RMBA), la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos severos caracterizados por lluvias intensas es la principal causa de riesgo ambiental (Re et al., 2018; Nadale, 2014). Se ha demostrado que eventos de lluvias intensas, con volúmenes por encima de los 100 mm por día, tienen un profundo impacto

social y contribuyen a la degradación de la infraestructura existente (UNLP, 2013; Bacchiega et al., 2015).

2.2.- Inundaciones urbanas

Desde el punto de vista antrópico se puede definir en forma general a las inundaciones como la presencia de agua sobre el terreno en lugares, formas y tiempos que resultan inadecuados para las actividades humanas y por lo tanto producen afectaciones económicas, sociales y ambientales (Paoli et al., 2015).

Es posible diferenciar los siguientes tipos de inundaciones:

- *Inundación por desborde de los cursos de agua*: se refiere a las zonas ribereñas que son cubiertas por las aguas cuando durante las crecidas importantes se desborda el/los cauces principales.
- *Inundación por anegamiento debido a lluvias locales*: se refiere a los terrenos que son temporalmente cubiertos por las aguas en situación de lluvias importantes y/o intensas, debido a una baja capacidad de infiltración, a la presencia de zonas bajas o deprimidas y deficiencia de la red de avenamiento.
- *Inundación por anegamiento debido al afloramiento de agua subterránea*: se refiere a los terrenos que son anegados debido al ascenso de la capa freática con motivo de lluvias prolongadas y tratarse de zonas topográficamente bajas.

En la RMBA se pueden mencionar como antecedentes importante las inundaciones debidas a los ríos Matanza (1967, 2000, 2010, 2012 y 2014), Luján (1985 y 2015) y San Antonio de Areco (2009 y 2015) vinculados a inundaciones de tipo ribereña; las inundaciones de Ciudad de Buenos Aires en 1985 y La Plata en 2013 asociadas a lluvias locales; la afectación en diversos partidos como Lanús, Avellaneda, Lomas de Zamora, Almirante Brown, entre otros asociados al ascenso en el nivel de agua subterránea (desde la década de los 80).

Además es en ésta región tienen lugar inundaciones debido a las *sudestadas*, que tienen lugar cuando se producen vientos del sector este o sudeste en el estuario del Río de la Plata, en forma sostenida por espacio de varias horas (Banco Mundial, 2001; Escobar et al., 2004).

Al urbanizarse una zona determinada, el ciclo hidrológico sufre, entre otros, dos grandes cambios. El primero es el aumento del escurrimiento por el incremento de las áreas impermeables, y el segundo está motivado por la existencia de conductos hidráulicos más eficientes que los cauces naturales, lo que redundará en un aumento de las velocidades del flujo y por lo tanto, en un incremento de los caudales máximos (Bertoni et al., 2004; Tucci, 2007).

La urbanización es creciente en el mundo y particularmente en Sudamérica (Da Cunha, 2003; Lattes, 2001). Esta tendencia, que también se registra en la Argentina (especialmente en la RMBA), genera continuas presiones para la ocupación del espacio urbano. Dentro de este contexto la atención a los problemas del drenaje urbano generalmente se realiza solo inmediatamente después de su ocurrencia, resultando en obras cuya vida útil es efímera.

2.2.1.- Amenaza en inundaciones urbanas

En el ámbito internacional se han suscripto dos marcos de acción para la reducción del riesgo de desastres: *Marco de Acción de Hyogo para 2005-2015: Aumento de la resiliencia de las naciones y las comunidades ante los desastres* (EIRD/ONU, 2005) y *Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030* (UNISDR, 2015).

En el Marco de Acción de Hyogo se define amenaza o peligro como evento físico potencialmente perjudicial, fenómeno o actividad humana que puede causar pérdida de vidas o lesiones, daños materiales, grave perturbación de la vida social y económica o degradación ambiental. Las amenazas o peligros incluyen condiciones latentes que pueden materializarse en el futuro. Pueden tener diferentes orígenes: natural (geológico, hidrometeorológico y biológico) o antrópico (degradación ambiental y amenazas tecnológicas) (EIRD/ONU, 2005).

En Argentina el protocolo sobre inundaciones repentinas de la Red de Organismos Científico - Técnicos para la Gestión Integral del Riesgo, GIRCyT (MINCyT, 2015) establece como amenaza a un factor externo representado por la posibilidad que ocurra un fenómeno o un evento adverso, en un momento, lugar específico, con una magnitud determinada y que podría ocasionar daños a las personas; la propiedad; la pérdida de medios de vida; trastornos sociales, económicos y ambientales. A su vez, establece como amenaza hidrometeorológica al proceso o fenómeno de origen meteorológico o hidrológico que puede ocasionar emergencias, incidentes o desastres.

El indicador más frecuente de las características de una inundación es la altura de inundación. Diferentes estudios identificaron la altura del agua como la característica de inundación que tiene la mayor influencia en los daños por inundación (Penning Rowsell et al., 1994, Wind et al., 1999). Otros criterios importantes para caracterizar la inundación son la velocidad del flujo, duración de la inundación (Merz et al., 2007; Lecertua, 2010) y el área inundada (Ollero Ojeda, 1997).

2.2.2.- Vulnerabilidad en inundaciones urbanas

En el Marco de Acción de Hyogo se define vulnerabilidad como las condiciones determinadas por factores o procesos físicos, sociales, económicos y ambientales que aumentan la susceptibilidad y exposición de una comunidad al impacto de amenazas (EIRD/ONU, 2005).

En este sentido la vulnerabilidad es multifacética (económica, política, cultural, social y ambiental), ya que puede operar a partir del manejo de distintos tipos de capitales. Para evaluar la vulnerabilidad, Kirby (2006) considera el capital físico, el humano, el social y el ambiental. El físico refiere a la posesión y a la propiedad de bienes económicos y materiales. El capital humano refiere las habilidades para hacer lo mejor en una situación dada, en donde la salud y la educación son activos importantes. El capital social reúne las redes sociales de apoyo, como la familia y las asociaciones. Y, finalmente, el capital ambiental son recursos como el suelo, el aire, el agua o las especies animales y vegetales de las que depende la vida humana (Natenzon y Ríos, 2015)

La vulnerabilidad social es una componente clave para comprender la configuración del riesgo de desastre. Analizar y entender los diferentes grados de vulnerabilidad de un grupo social determinado, permite evaluar con qué recursos materiales y no materiales cuentan las personas para enfrentar los desafíos que imponen los riesgos de desastre eventualmente más severos (González et al., 2016).

Existen diversos aspectos de la vulnerabilidad que surgen de varios factores físicos, sociales, económicos y ambientales. Entre los ejemplos se incluyen el diseño inadecuado y la construcción deficiente de la infraestructura, la protección inadecuada de los bienes, la falta de información y de concientización pública, un reconocimiento oficial limitado del riesgo y de las medidas de preparación y la desatención a una gestión ambiental sensata o prudente. La vulnerabilidad varía considerablemente dentro de una comunidad y en el transcurso del tiempo (UNISDR, 2009).

La fragilidad socioeconómica se representa mediante indicadores de pobreza, inseguridad humana, dependencia, analfabetismo, disparidad social, desempleo, inflación, deuda y degradación ambiental. Son índices que reflejan debilidades relativas o condiciones de deterioro que agravarían los efectos directos causados por fenómenos peligrosos (Cannon, 2003; Davis, 2003; Wisner et al., 2003; Barrenechea et al., 2003).

2.2.3.- Impacto en inundaciones urbanas

La información existente indica que, en todos los países, el grado de exposición de las personas y los bienes ha aumentado con más rapidez de lo que ha disminuido la vulnerabilidad, lo que ha generado nuevos riesgos y un incremento constante de las pérdidas relacionadas con los desastres, con un considerable impacto en los ámbitos económico, social, sanitario, cultural y ambiental a corto, medio y largo plazo, en especial a nivel local y comunitario. Los desastres recurrentes de pequeña escala y evolución lenta inciden particularmente en las comunidades, las familias y las pequeñas y medianas empresas, y constituyen un alto porcentaje de todas las pérdidas. (UNISDR, 2015)

A nivel nacional y local es necesario evaluar, registrar, compartir y dar a conocer al público, de manera sistemática, las pérdidas causadas por desastres y comprender el impacto económico, social, sanitario, educativo y ambiental y en el patrimonio cultural, como corresponda, en el contexto de la información sobre la vulnerabilidad y el grado de exposición a amenazas referida a sucesos específicos (UNISDR, 2015)

Según MINCyT, 2015 se define al impacto por inundaciones a la materialización del daño potencial implícito en una amenaza al hacer interacción con una población vulnerable. A su vez, se clasifica a los mismos en impactos directos e indirectos. Los primeros son aquellos que mantienen relación de causalidad directa e inmediata con la ocurrencia de un fenómeno físico, representados usualmente por el impacto en las infraestructuras, sistemas productivos, bienes y acervos, servicios y ambiente, o por el impacto inmediato en las actividades sociales y económicas. Los impactos indirectos son aquellos que mantienen relación de causalidad con los efectos directos, representados usualmente por impactos concatenados sobre las actividades económicas y sociales o sobre el ambiente. Normalmente los impactos indirectos cuantificados son los que tienen efectos adversos en términos sociales y económicos, por ejemplo, pérdidas de oportunidades productivas y de ingresos futuros, aumento en los niveles de pobreza, aumento en costos de transporte debido a la pérdida de caminos y puentes, etc.

Las evaluaciones de impacto por inundación pueden servir para una variedad de propósitos. Por ejemplo, gobiernos locales o nacionales los utilizan para la toma de decisiones y la gestión de riesgos, de modo que los recursos se pueden asignar para financiar medidas estructurales y no estructurales de mitigación de inundaciones (Hammond et al., 2015) y como insumo de información para los ciudadanos para la toma de decisiones (reducir exposición, medidas de contingencia, entre otros) (Re et al., 2019).

La diversidad de los propósitos de la evaluación del impacto por inundación, combinadas con las diferencias en la disponibilidad de datos y acceso a los recursos, significa que hay muchas técnicas diferentes de evaluación de impactos por inundación (Messner et al., 2007).

2.3.- Modelación hidrológica – hidráulica

La representación de la dinámica del escurrimiento superficial mediante modelación numérica resulta de importancia para sus diversas aplicaciones; tales como utilización en sistemas de alerta de inundaciones, delimitación de zonas de inundación, zonas de riesgo para la vida humana, impacto de obras de infraestructura (carreteras, terraplenes), impacto de

desarrollo de ciudades, evaluación y diagnóstico de la situación actual, y estudio e impactos de obras destinadas al saneamiento hídrico (Stenta et al., 2016).

Típicamente, las inundaciones urbanas son estudiadas usando aproximaciones de modelación 1D (Silveira et al., 2012), 1D/1D (Mark et al., 2004; Leandro et al., 2009), 2D (Roca y Davison, 2010; Liang y Smith, 2015) o 1D/2D (Chen et al., 2015; Velasco et al., 2016), siendo las modelaciones 1D y 2D representativas del curso principal y 1D/1D y 1D/2D del sistema dual de drenaje urbano. Seleccionar la técnica de modelación más apropiada significa equilibrar la precisión, el tiempo de computación y disponibilidad de datos, y además tomar en cuenta el nivel de comunicación entre los sistemas de drenaje mayor y menor (van Dijk et al., 2014).

El modelo hidrológico - hidráulico Storm Water Management Model (SWMM) (EPA, 2005) es un modelo de simulación precipitación - escorrentía dinámico utilizado para eventos únicos o simulación a largo plazo (continuos) de la cantidad y calidad de escorrentía principalmente para áreas urbanas.

El módulo de escorrentía de SWMM opera en una colección de áreas de subcuencas que reciben la precipitación y generan escorrentía y cargas contaminantes. Este se acopla al módulo de transporte en el cual el flujo generado por escorrentía o aportes de caudal externo se realiza a través de un sistema de conductos, canales, dispositivos de almacenamiento/tratamiento, bombas y reguladores (Figura 1).

SWMM fue extensamente testado en evaluaciones de inundaciones urbanas en ámbitos urbanos sobre áreas densamente pobladas (Huong y Pathirana, 2013; Yu et al., 2014; entre muchos otros) por lo cual será utilizado en este trabajo.

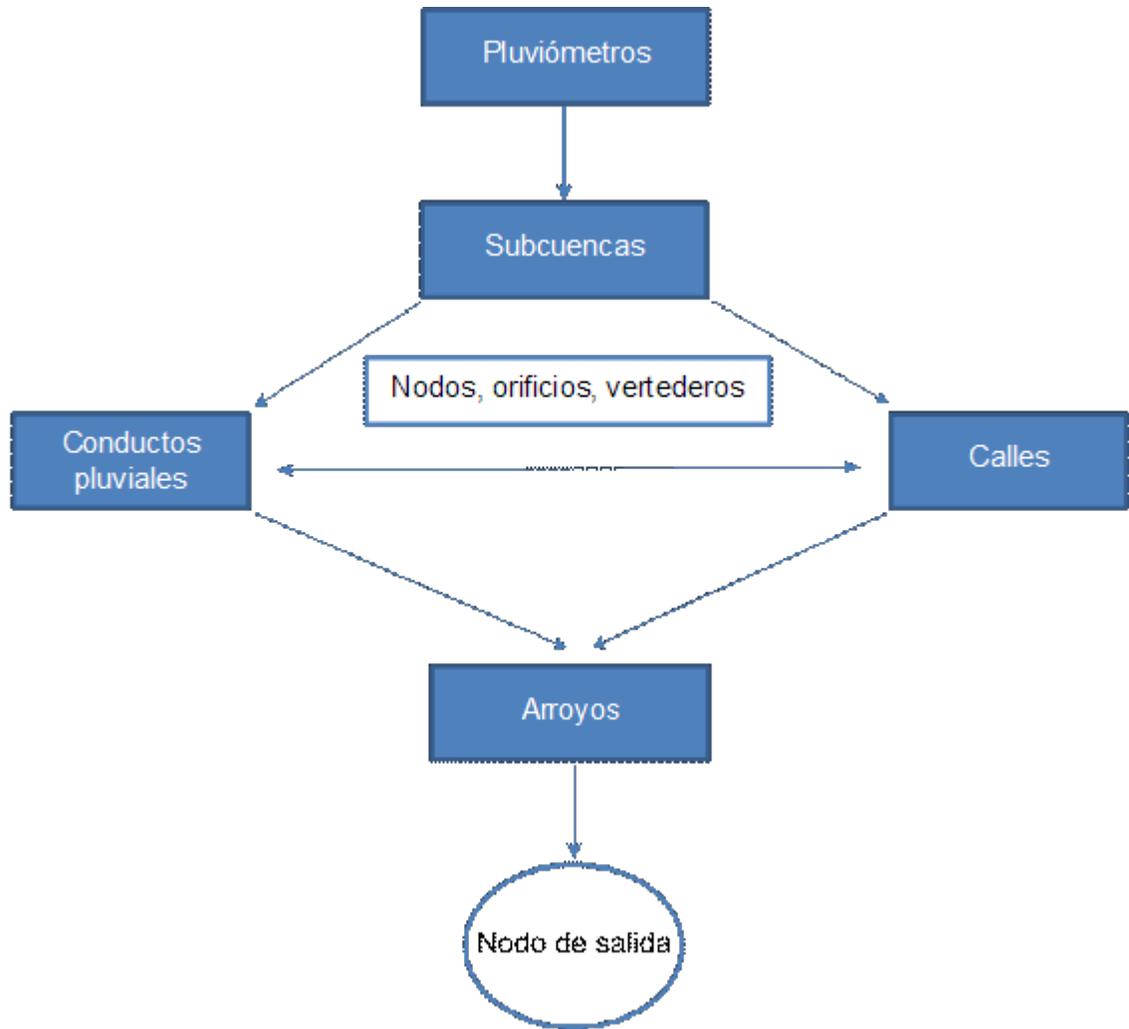


Figura 1.- Elementos hidrológicos e hidráulicos utilizados en EPA - SWMM.

2.4.- Sistemas de información geográfica

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es un sistema que integra tecnología informática, personas e información geográfica, y cuya principal función es capturar, analizar, almacenar, editar y representar datos georreferenciados (Korte, 2001).

Según Olaya (2012), cinco son los elementos principales que se contemplan tradicionalmente en este aspecto:

- Datos. Los datos son la materia prima necesaria para el trabajo en un SIG, y los que contienen la información geográfica vital para la propia existencia de los SIG.
- Métodos. Un conjunto de formulaciones y metodologías a aplicar sobre los datos.
- Software. Es necesaria una aplicación informática que pueda trabajar con los datos e implemente los métodos anteriores.
- Hardware. El equipo necesario para ejecutar el software.

- Personas. Las personas son las encargadas de diseñar y utilizar el software, siendo el motor del sistema SIG.

Los SIG incluyen por tanto numerosas funciones para el manejo de datos espaciales en formato digital. Estas funciones pueden clasificarse en (Sarría, 2004):

- Almacenamiento de datos espaciales y temáticos. Para ello es necesario definir modelos de datos con los que codificar los diferentes aspectos del territorio.
- Visualización de estos datos en forma de mapas, tablas o gráficos.
- Consultas que permiten seleccionar aquellos elementos que cumplen un conjunto de condiciones, de tipo espacial o no espacial. Los resultados pueden obtenerse como un valor, una tabla o un mapa.
- Análisis de datos. Búsqueda de regularidades en los datos que permitan verificar hipótesis acerca de los mismos.
- Modelación. Utilizando los resultados de los análisis de datos (modelos estadísticos) o mediante aplicación de modelos matemáticos y físicos. Permiten utilizar el modelo matemático del territorio almacenado en el SIG para utilizar y validar diversas hipótesis.

En un nivel superior algunos sistemas ofrecen la posibilidad de llevar a cabo funciones analíticas junto a comandos del sistema operativo a modo de un lenguaje interpretado de programación. Estos lenguajes macro proporcionan un conjunto de instrucciones que facilitan la elaboración de análisis en modelos hidrológicos (Morad y Pérez, 2001).

En el presente trabajo la utilización de los SIG es una herramienta fundamental para el armado de la estructura del modelo hidrológico e hidráulico. A partir del uso de información matricial (raster) y vectorial es posible determinar las propiedades físicas de la cuenca (delimitación de cuenca, áreas de aporte, pendientes, topografía, porcentaje de impermeabilidad, entre otras), asignar propiedades hidráulicas a la red de drenaje (ancho, longitud, rugosidad, pendiente, entre otras) y representar el comportamiento espacial y temporal de la precipitación. Esta herramienta acoplada con un lenguaje interpretado de programación permite ahorrar tiempo en el diseño y desarrollo de sistemas complejos.

2.4.1.- Teledetección

Teledetección es la técnica que permite obtener información a distancia de objetos sin que exista un contacto material. Para que ello sea posible es necesario que, aunque sin contacto material, exista algún tipo de interacción entre los objetos observados; situados sobre la superficie terrestre, marina o en la atmósfera; y un sensor situado en una plataforma (satélite, avión, etc.). En el caso la teledetección la interacción que se produce va a ser un flujo de radiación que parte de los objetos y se dirige hacia el sensor. Este flujo puede ser, en cuanto a su origen, de tres tipos:

- Radiación solar reflejada por los objetos (luz visible e infrarrojo reflejado)
- Radiación terrestre emitida por los objetos (infrarrojo térmico)
- Radiación emitida por el sensor y reflejada por los objetos (radar)

Las técnicas basadas en los dos primeros tipos se conocen como teledetección pasiva y la última como teledetección activa (Sarría, 2004).

El objetivo de toda clasificación es el reconocimiento de clases o grupos cuyos miembros tengan ciertas características en común. El resultado ideal sería la obtención de clases mutuamente excluyentes y exhaustivas. En Teledetección, las clases obtenidas cuando se realiza una clasificación deben ser espectralmente diferentes unas de otras, y además deben contener un valor informativo de interés para la investigación de que se trate. Tradicionalmente, se han seguido dos enfoques en la realización de las clasificaciones: uno de tipo supervisado y otro de tipo no supervisado. El enfoque de tipo supervisado supone un entrenamiento clasificador a través de un conocimiento a priori de la verdad terreno que se ha seleccionado como representativa de las clases informacionales que se quieran reconocer en la imagen. El enfoque no supervisado no precisa el conocimiento previo de una verdad terreno, y tiene la pretensión de segmentar la imagen en una serie de clases por procedimientos exclusivamente numéricos, basándose sólo en la estructura que posean los datos espectrales (Romero, 2016).

La precisión de las observaciones satelitales, junto con la calibración in situ y el uso de modelos digitales del terreno (MDT) de alta resolución en un entorno SIG, hicieron posible la construcción de nuevos modelos hidráulicos en este respecto (Koblinsky et al. 1993; Smith et al. 1996; Massonnet, 1997).

La clasificación supervisada fue utilizada en particular para el estudio del avance de la urbanización que se desarrolla en la cuenca y la discriminación de áreas permeables e impermeables a partir de fuentes aerofotogramétricas a la cual se le aplicó un postprocesamiento para el desarrollo de un MDT de alta resolución espacial.

2.4.2.- Bases de datos

Una Base de Datos (BD) es una entidad en la cual se pueden almacenar datos de forma sistemática, de manera que se pueda permitir su posterior uso. Generalmente se habla de un 'Sistema de información' para designar a la estructura global que incluye todos los mecanismos para compartir datos. En ese sentido, existen programas llamados Sistemas de Gestión de Bases de Datos (SGBD), que permiten almacenar y organizar la información de manera estructurada para acceder a la BD de manera recurrente. Los usuarios pueden acceder y gestionar la BD comunicándose con el SGBD a través de algún cliente o software de manejo de bases de datos, como SQL Server, Microsoft Access o pgAdmin (Seppi, 2018).

Durante mucho tiempo la información geoespacial se almacenaba en algún formato especializado que daba lugar a una base de datos específica y dedicada a ello, donde sólo se disponen datos espaciales para su posterior gestión y manipulación. Ejemplo de ello son los formatos vectoriales (shapefile, json o kml, por ejemplo): el uso de este tipo de archivos sigue vigente y presentan gran utilidad, sobre todo cuando se trata de intercambiar datos entre distintas organizaciones o usuarios, dada su difusión como formatos estándar. Sin embargo, organizar los datos geoespaciales de esta manera no permite dar una estructura coherente a la información, limita sus capacidades de análisis espacial, y muchas veces se termina desperdiciando espacio de almacenamiento. En respuesta a dicha falencia, en los últimos años han aparecido desarrollos que ofrecen la posibilidad de almacenar y gestionar de manera conjunta todo tipo de datos dentro de una misma BD, en muchos casos agregando extensiones espaciales o geográficas a motores de BD ya existentes (Seppi, 2018).

En este trabajo se utilizaron fuentes de datos disponibles en el Sistema Nacional de Información Hídrica pertenecientes a diferentes organismos nacionales involucrados en la medición de variables hidrológicas.

2.5.- Hidrometría

A nivel nacional se cuenta con una Red Hidrológica Nacional (RHN) perteneciente a la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica operada por terceros y conformada por 369 puntos de medición de variables hidrológicas y meteorológicas. En la Figura 2 se observa la distribución espacial de las estaciones activas y suspendidas, siendo muy escasa la presencia en la RMBA.

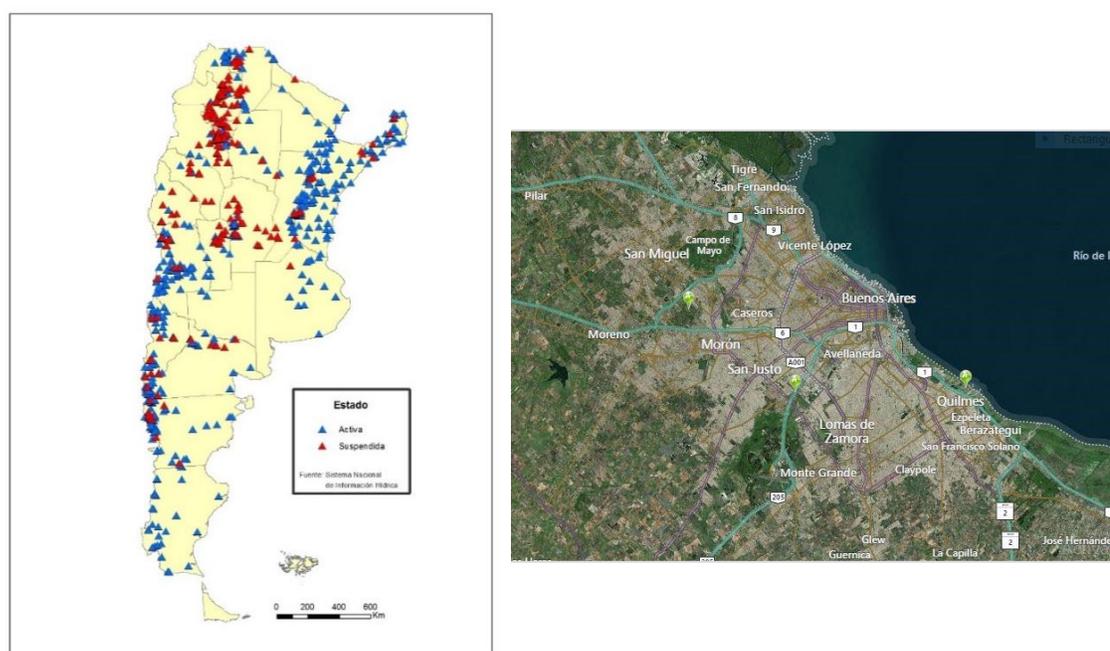


Figura 2.- Estaciones hidrológicas a nivel nacional (izquierda) y en la RMBA (derecha). Fuente: Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica, 2019.

Dada la escasa presencia de estaciones hidrométricas presentes en la RMBA surge la necesidad de instrumentar cuencas para su estudio, como ocurre en el caso de la Autoridad de Cuenca Matanza – Riachuelo (ACUMAR), la cual instaló unas 15 estaciones meteorológicas y cuenta con 70 puntos de medición de variables hidrológicas y ambientales.

En este contexto el Programa de Hidráulica Computacional del Instituto Nacional del Agua avanzó en la instalación de instrumental hidrométrico para el estudio del comportamiento hidrológico e hidráulico de cuencas urbanas en la RMBA (Figura 3), incluyendo:

- Instalación de dos sensores de nivel, uno sobre el arroyo San Francisco en la Estación de Bombeo N°10 y otro sobre el arroyo Las Piedras en la Estación de Bombeo N°4. Los sensores de nivel están compuestos por un transmisor de nivel y un datalogger, teniendo la capacidad de transmitir a través de red celular 2G y 3G. El sensor funciona por medio de ultrasonido, basado en la velocidad de desplazamiento de un impulso de frecuencia ultrasónica (mayor a 20 kHz), que es emitido por un transmisor situado en una estructura situada instalada sobre el río. Cuando el impulso llega a la superficie de la masa de agua, emite un eco que es captado por el sensor. El tiempo transcurrido desde el momento de la emisión del impulso y el momento de la recepción del eco por el sensor es directamente proporcional a la distancia d entre el sensor y la superficie del agua.

- Instalación de dos pluviómetros en el partido de Florencio Varela, uno en la localidad de Gobernador Costa en el Centro de Salud Padre Mugica y otro en la localidad de Ingeniero Allan en la Delegación Municipal de Ingeniero Allan. Los pluviómetros instalados son de la marca DAVIS con sistema de cangilones de 0.2 mm de precisión y transmisión de la información por red de celular.

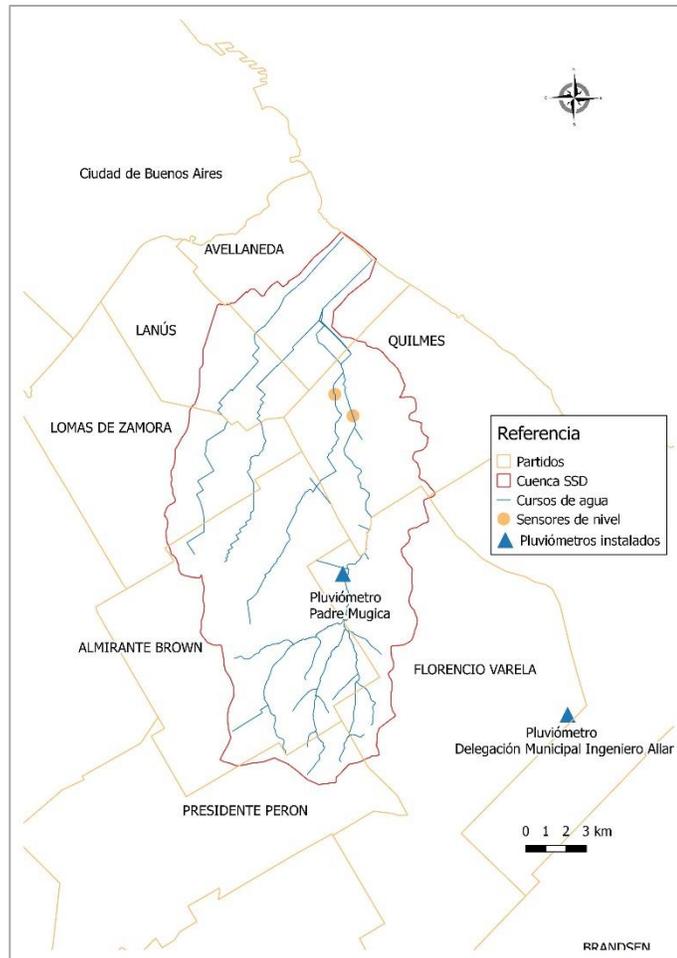


Figura 3.- Instrumental hidrométrico instalado.

3.- MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.- Características generales de la RMBA

La Región Metropolitana de Buenos Aires (RMBA) se encuentra constituida por la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA) más 43 partidos de la Provincia de Buenos Aires (Figura 4), los cuales pueden representarse en tres grandes cordones de crecimiento según el desarrollo histórico de la conurbación alrededor de la ciudad central. La Primera Corona metropolitana incluye los partidos de Avellaneda, General San Martín, Hurlingham, Ituzaingó, José C. Paz, Lanús, Lomas de Zamora, Malvinas Argentinas, Morón, Quilmes, San Isidro, San Miguel, Tres de Febrero, Vicente López y parte de La Matanza. La Segunda Corona alcanza a los partidos de Almirante Brown, Berazategui, Esteban Echeverría, Ezeiza, Florencio Varela, Merlo, Moreno, San Fernando, Tigre y parte de La Matanza. La Tercera Corona incluye los distritos de Escobar, General Rodríguez, Marcos Paz, Pilar, Presidente Perón, San Vicente, Cañuelas, Berisso, Ensenada y La Plata. La Primera y la Segunda Corona, representadas por los 24 partidos del Gran Buenos Aires, también conocidos como Conurbano Bonaerense, sumadas a la CABA constituyen el Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA).

Según datos del Censo de Población del INDEC (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos) de 2010, el Área Metropolitana de Buenos Aires ocupa una superficie total de 2590 kilómetros cuadrados y reúne 12.8 millones de habitantes, lo cual representa una concentración cercana al 32 % de la población total del país; asimismo produce alrededor del 40 % del PBI nacional. Debido a esta destacada participación económico-demográfica, el área metropolitana se ha constituido en el centro productivo, comercial, financiero y político más importante del país. Mientras que el 23 % de toda su población reside en la ciudad Capital (2.9 millones de habitantes), el 77 % lo hace en el Conurbano Bonaerense (9.9 millones de habitantes). Hasta el momento, la región no cuenta con unidad administrativa ni dispone de coordinación político-institucional (Salvia, 2011).

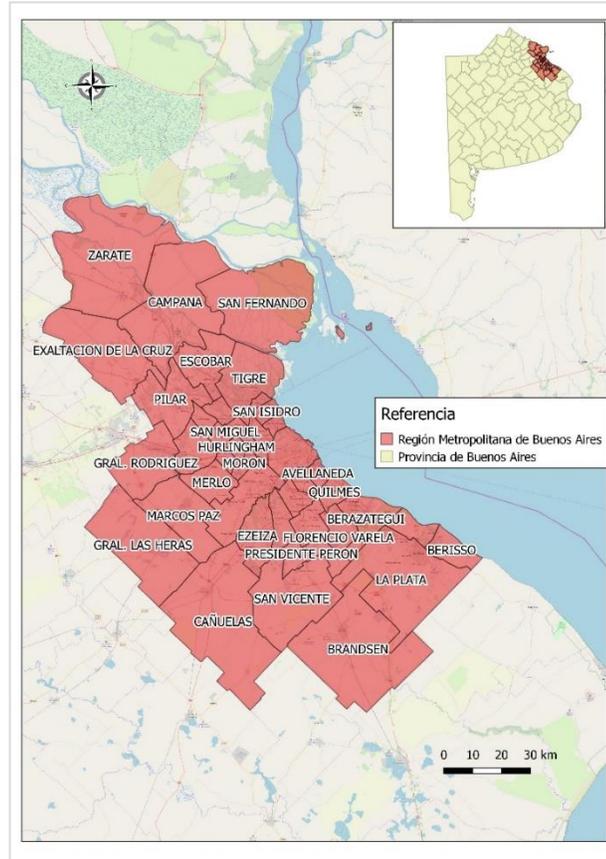


Figura 4.- Región Metropolitana de Buenos Aires.

3.1.2.- Clima

La República Argentina presenta alta variabilidad espacial y temporal en el campo de precipitaciones, presentando mayores volúmenes anuales en la región noreste. Como se observa en la Figura 5, la cuenca Sarandí – Santo Domingo se encuentra comprendida entre las isohietas de 1000 y 1200 milímetros anuales. Según las tendencias de precipitación observadas durante el período 1961 – 2016 se verifica una tendencia positiva del orden de 200 mm anuales (Figura 6).

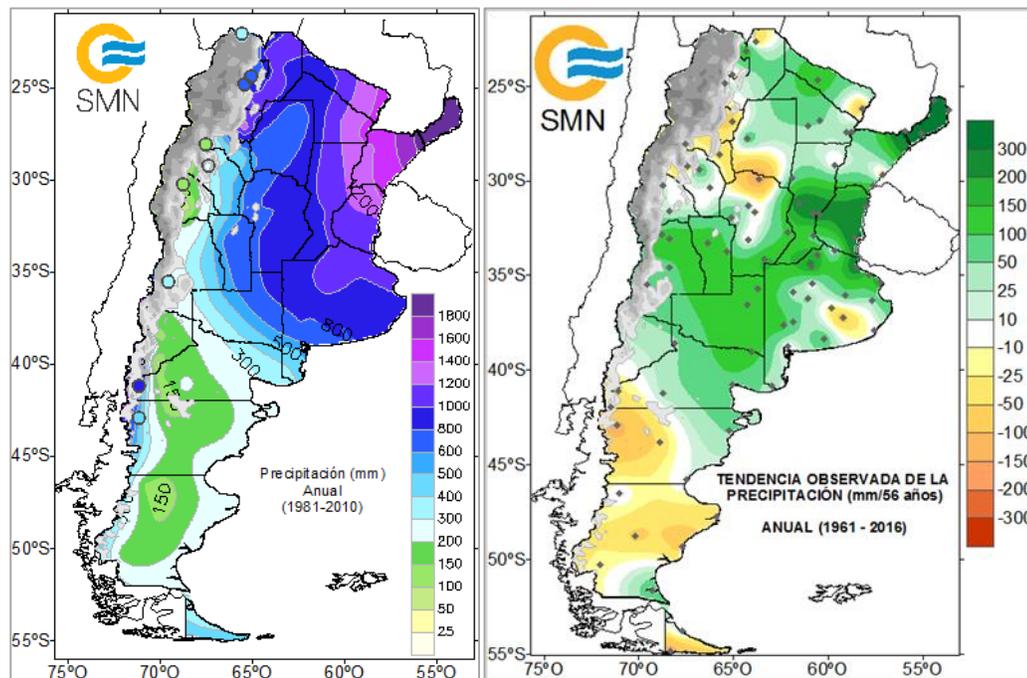


Figura 5.- Precipitación anual en Argentina, periodo 1961 – 2010 (izquierda) y tendencia de precipitación, periodo 1961 – 2016 (derecha). Fuente: Servicio Meteorológico Nacional.

Para caracterizar el régimen de precipitación en la RMBA, se cuenta con la información de seis estaciones oficiales de observación de parámetros atmosféricos (gestionadas por el Servicio Meteorológico Nacional, SMN): Ezeiza (Aeropuerto Ministro Pistarini), Castelar, San Miguel, El Palomar, Aeropuerto Jorge Newbery, y Observatorio Central de Buenos Aires (OCBA, Villa Ortuzar) (Figura 6). De estas estaciones, las que resultan más representativas respecto de las características de precipitación en la cuenca Sarandí – Santo Domingo son las estaciones del OCBA, localizada en una zona urbanizada (tipología similar a la de las cuencas media y baja), Ezeiza en una zona suburbana (similar a la cuenca alta) y La Plata Aero.

Caracterización del impacto por inundación en una cuenca urbana

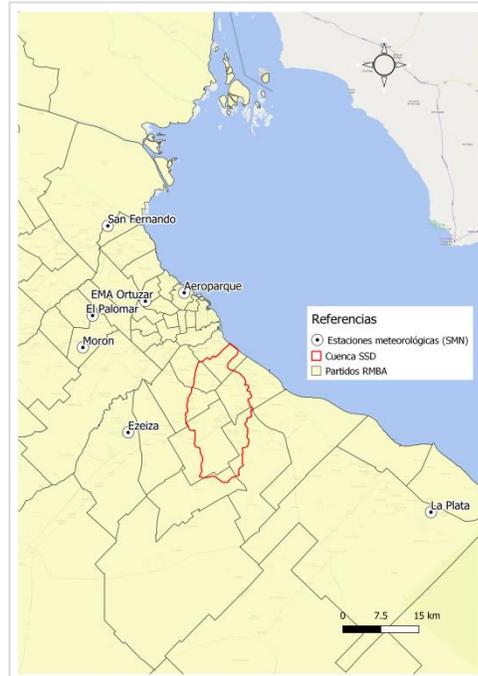


Figura 6.- Ubicación estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional.

La RMBA presenta un clima subtropical templado sin estación seca, con promedios mensuales entre 50 y 130 mm, donde el mayor acumulado de precipitación se extiende entre los meses de octubre a marzo (Figura 8) (Kazimierski et al., 2015).



Figura 7.- Precipitación media mensual en Observatorio Central Buenos Aires y Ezeiza Aero. Serie 1961-2018.

Se observa un comportamiento homogéneo en la precipitación de las estaciones estudiadas, pudiendo constatarse que los valores mínimos medios se dan durante los meses de junio a agosto, en tanto los valores máximos medios se registran de octubre a marzo (Figura 7).

Caracterización del impacto por inundación en una cuenca urbana

La precipitación máxima diaria registrada por estación meteorológica (Figuras 8 y 9) fue: 188 mm en Observatorio Central Buenos Aires (31 de mayo de 1985) y 128 mm en Ezeiza Aero (15 de diciembre de 1961). En ambas estaciones se registró que las precipitaciones máximas mensuales se dieron durante el mes de marzo.

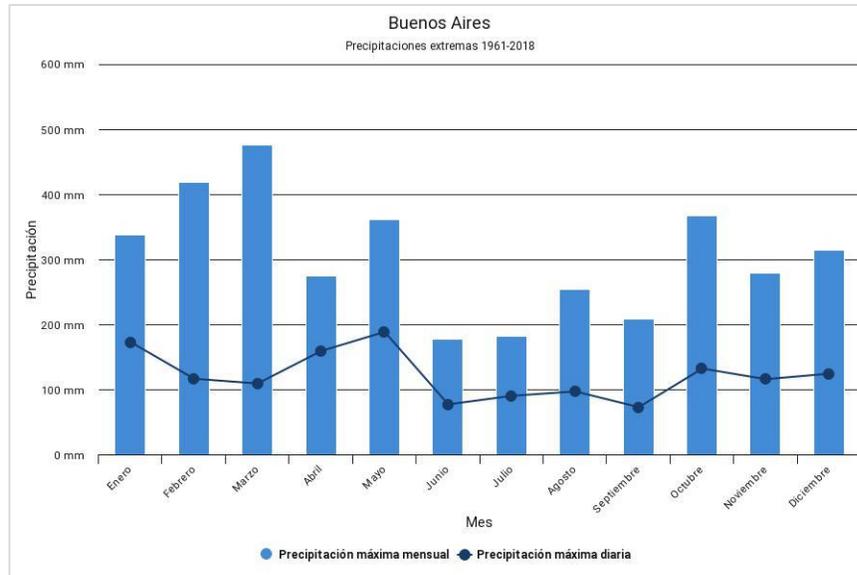


Figura 8.- Precipitación máxima mensual y máxima diaria. Observatorio Central Buenos Aires 1961-2018. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional.

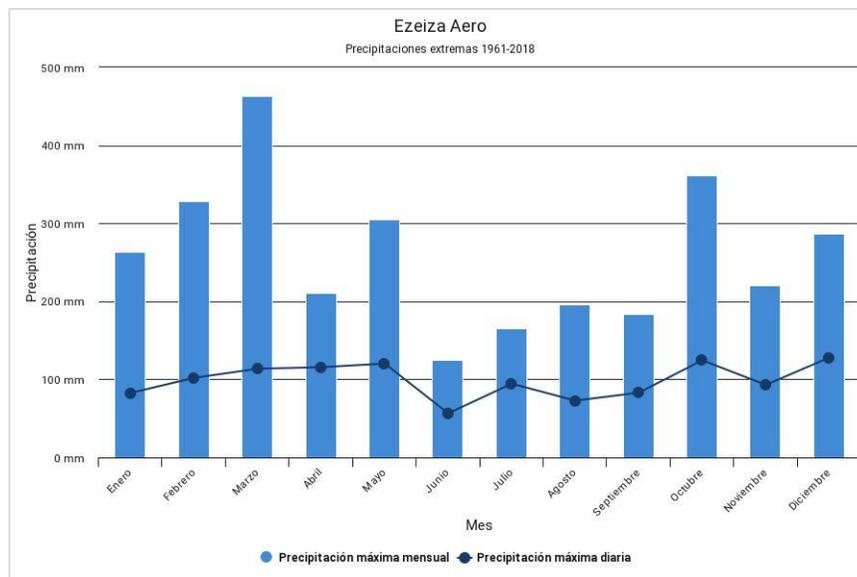


Figura 9.- Precipitación máxima mensual y máxima diaria. Estación Ezeiza Aero 1961 – 2018. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional.

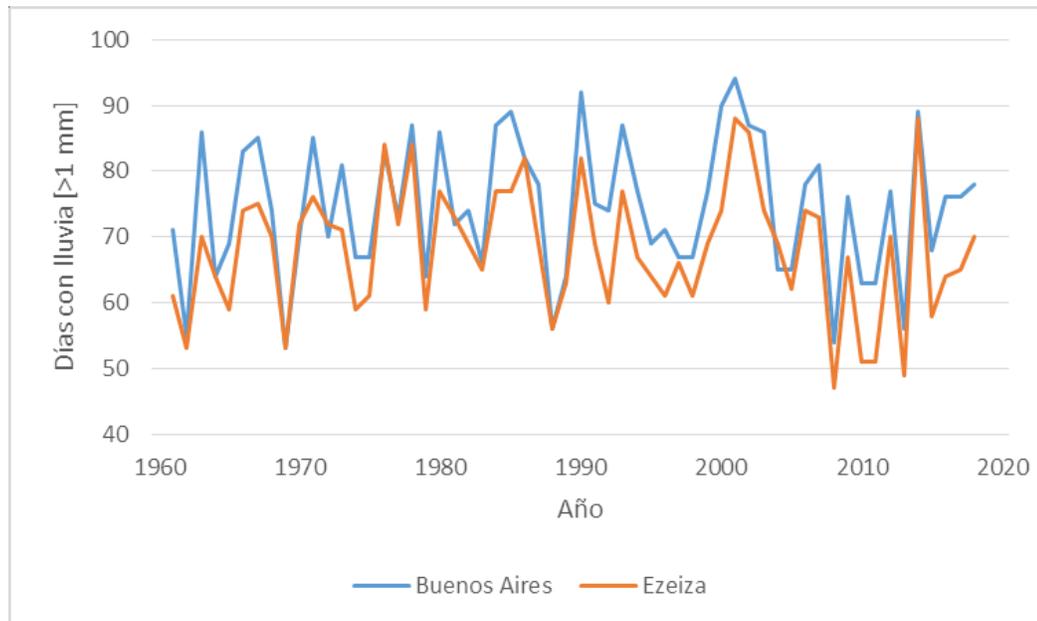
La cantidad de días con lluvia por año resulta una variable importante para cuantificar la temporalidad de la amenaza. Existen diferentes criterios, umbral de precipitación, para contabilizar días con lluvia: la existencia de lluvia (precipitación mayor a 1 mm en el día), la caracterización de un día lluvioso (precipitación mayor a 20 mm en el día) y un día muy lluvioso

(precipitación mayor a 50 mm en el día). Este último criterio se relaciona con la cantidad de eventos extremos de precipitación que ocurren en la región por año (Kazimierski et al., 2015).

En la Tabla 1 se muestra la cantidad de días con lluvia en cada estación según los tres criterios explicitados. En la Figura 10 se presentan las series de días con lluvia para ambas estaciones. En todos los casos se encuentra que existen más días con lluvias en la estación OCBA que en Ezeiza y una frecuencia media de 4 y 3 días por año, respectivamente, con eventos mayores a 50 mm.

Tabla 1.- Días con lluvia promedio (DcLL) en estaciones OCBA y Ezeiza, serie 1961 - 2018.

Estación	Precipitación media anual [mm]	DcLL (mayor a 1 mm)	DcLL (mayor a 20 mm)	DcLL (mayor a 50 mm)
OCBA	1195	74	20	4
EZE	1005	68	16	3



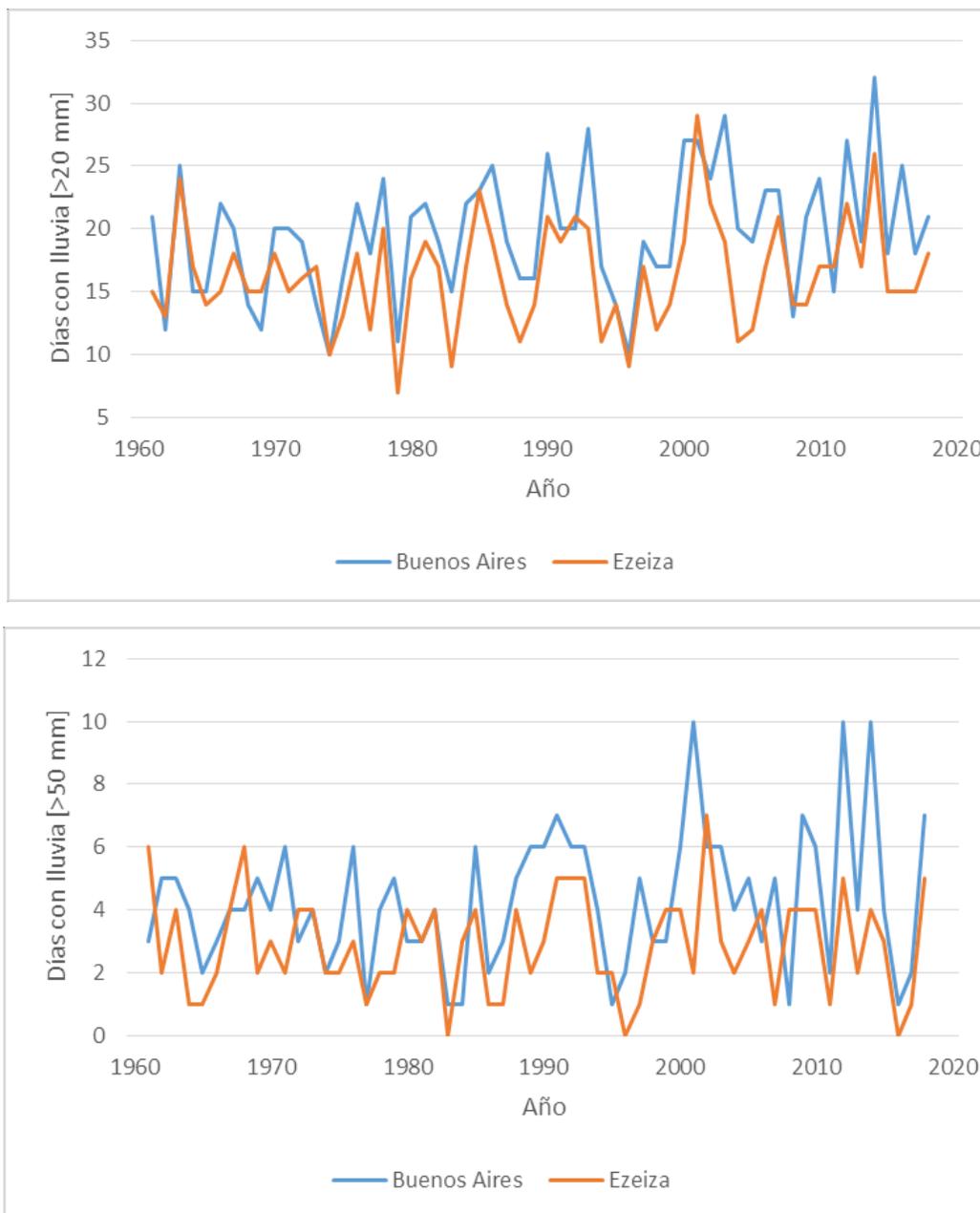


Figura 10.- Evolución días con lluvia por año.

3.1.2.1.- Sudestadas

La sudestada se caracteriza por la ocurrencia de vientos persistentes, de intensidad moderada a fuerte, proveniente del sur - sudeste, generalmente acompañado con lluvias. De manera característica afecta el estuario del Río de la Plata provocando importantes crecientes e inundaciones. Su duración es de 1 a 3 días, pero se han dado casos de mayor duración (Ciapesoni y Salio, 1997; Escobar et al., 2004). El fenómeno de sudestada afecta las márgenes y el valle aluvial del Río de la Plata y por efecto de remanso al Riachuelo, hasta arriba del Puente de La Noria, y sus márgenes y la parte inferior de las cuencas. Hacia el sur del Gran Buenos Aires se encuentran numerosos arroyos que desaguan directamente en el Río de la Plata, que también se ven afectados por sudestadas o tormentas intensas. Al sur de la Cuenca

del Matanza - Riachuelo se destacan, de norte a sur, los arroyos Sarandí, de las Piedras, Santo Domingo, condicionando la descarga de los cursos de agua de las cuencas vertientes al Río de la Plata (Lecertua et al., 2015).

El Río de la Plata puede crecer hasta 4 m respecto de su nivel de referencia (cero del Riachuelo o cero MOP) como por ejemplo 4.44 m el 15/4/40; 4.06 m en 1989; 3.90 m el 6/2/93; 3.39 m el 10/12/93, etc. Estas crecientes del Río de la Plata producen anegamientos en su planicie aluvial, como por ejemplo en la zona de la Boca y Barracas (en la ciudad de Buenos Aires) y en los partidos de Lomas de Zamora, Lanús y Avellaneda (en la Provincia de Buenos Aires) donde se producen inundaciones a partir de ascensos de 2.70 m por encima del cero de referencia (Pereyra, 2004; Re et al., 2015).

3.1.3.- Hidrología

Entre las principales cuencas presentes en la RMBA se encuentran las del río Lujan, río Reconquista, Arroyos Vega, Medrano y Maldonado, río Matanza - Riachuelo y las cuencas de los arroyos vertientes al Río de la Plata hacia el sur de la región.

La cuenca del río Luján posee un área de 3295 km² y se encuentra conformada por las subcuencas de los ríos Luján, arroyo Escobar, Garín, Claro y De Las Tunas.

La cuenca del río Reconquista tiene una extensión de unos 1738 km² y posee una longitud de 82 km. Su tramo superior y medio que corresponde al 60 % de la cuenca tiene características rurales, mientras que el 40 % restante perteneciente a su tramo inferior presenta características de cuenca urbana y semi urbana. El curso fluye con rumbo dominante SO-NE, desembocando actualmente en el río Luján en la zona de Tigre, si bien es probable que un antiguo brazo del mismo desembocara directamente en el Río de la Plata, a la altura de San Fernando. Existen en el área, gran cantidad de cauces intermitentes y/o canales artificiales producto de la acción del hombre pero en conjunto los caudales que aportan pueden considerarse insignificantes respecto a los anteriores (DPSPAYC, 2014)

En la cuenca Matanza – Riachuelo área total abarca una superficie de unos 2303 km², presenta una forma irregular con un ancho máximo de 40 km y una longitud máxima de 70 km, el relieve en general es llano, con cotas superiores aproximadas de 38 metros en su cabecera y 3 metros en desembocadura (DPSPAYC, 2014).

Las cuencas vertientes al Río de la Plata abarcan el área limitada con el Río de la Plata, el río Samborombón, porción inferior del río Matanza y la cuenca del arroyo Pescado. Se incluyen total o parcialmente los partidos de Berazategui, Berisso, Ensenada, Florencio Varela, La Plata, Quilmes, Avellaneda, Almirante Brown, Lómas de Zamora, Lanús, entre otros. La morfología se halla fuertemente enmascarada y, en partes, modificada por la gran urbanización. Por otra parte, se ha alterado la red de drenaje original con la canalización y/o entubamiento de los cursos de agua. Las cuencas vertientes al Río de la Plata se encuentran altamente urbanizadas, presentando un menor grado de impermeabilización en su parte alta. De noroeste a sureste se encuentran las cuencas de los arroyos Sarandí, Las Perdices, Santo Domingo, Jiménez, Las Conchitas, Baldovinos, Pereyra, Carnaval, Martín, Rodríguez, Del Gato y Maldonado (Figura 11).

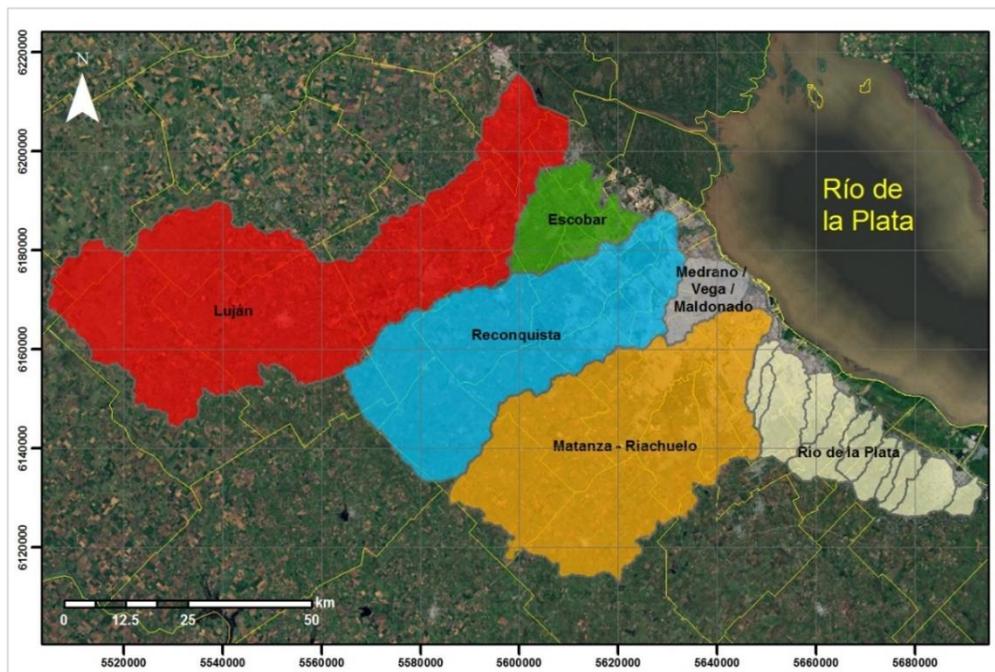


Figura 11.- Cuencas Luján, Escobar, Reconquista, Medrano, Vega, Maldonado, Matanza – Riachuelo y vertientes al Río de la Plata.

3.1.4.- Geomorfología

La región estudiada integra el sector austral de la gran Llanura Chacopampeana y se caracteriza por ser un ámbito con pendiente dominante hacia el NE y cotas extremas de 30 m en la divisoria coincidente con el límite SO y de 0 m en la ribera del Río de la Plata. Entre dichos ámbitos, separados por 23 km, el gradiente topográfico medio es de 1 m/km. La Planicie Costera (Auge, 1990) que ocupa 318 km², se extiende en forma de faja paralela a la costa del Río de la Plata, en un ancho de 6 a 10 km, constituyendo un ámbito casi sin relieve, entre cotas 5 y 0 m, lo que deriva en gradientes topográficos extremos de 0.5 y 0.8 m/km. Esta condición topográfica limita notoriamente el flujo superficial, dificultando severamente la llegada natural de las aguas provenientes de la Llanura Alta, hasta el nivel de base regional constituido por el Río de la Plata. A esto coadyuva la existencia de cordones o albardones costeros de arena y de conchilla, generalmente emplazados por encima de la cota 2.5 m que, dispuestos paralelamente a la línea de ribera, actúan como barreras para los flujos (dificultando el escurrimiento hacia la desembocadura). Por ello, para que las aguas superficiales lleguen al Río de la Plata, generalmente es necesario efectuar canalizaciones. Lo antedicho da lugar a la formación de un ambiente mal drenado, de tipo cenagoso, con agua subterránea aflorante o a muy poca profundidad (generalmente a menos de 1 m), donde predomina notoriamente la dinámica vertical sobre la lateral, lo que hace que funcione como el principal ámbito de descarga subterránea natural de la región (Auge, 2005).

Los laterales de valles ocupan la porción del paisaje comprendida entre las divisorias más altas (cotas superiores a 10 m) y las planicies aluviales y terrazas de los cursos fluviales. Las pendientes tienen gradientes entre 3 a 7 % y han sido originadas por procesos erosivos y de depósito vinculadas a la acción eólica y al escurrimiento superficial. Salvo en algunos sectores deprimidos, vinculados a la acción eólica pasada, presentan baja probabilidad de anegamiento (Pereyra, 2004).

Como puede observarse en la Figura 12, el arroyo Sarandí y el arroyo Las Piedras se unían al río Matanza – Riachuelo para luego desembocar en el Río de la Plata, situación que se vio modificada por la eliminación de meandros con el objeto de rectificar y canalizar los cauces fluviales.

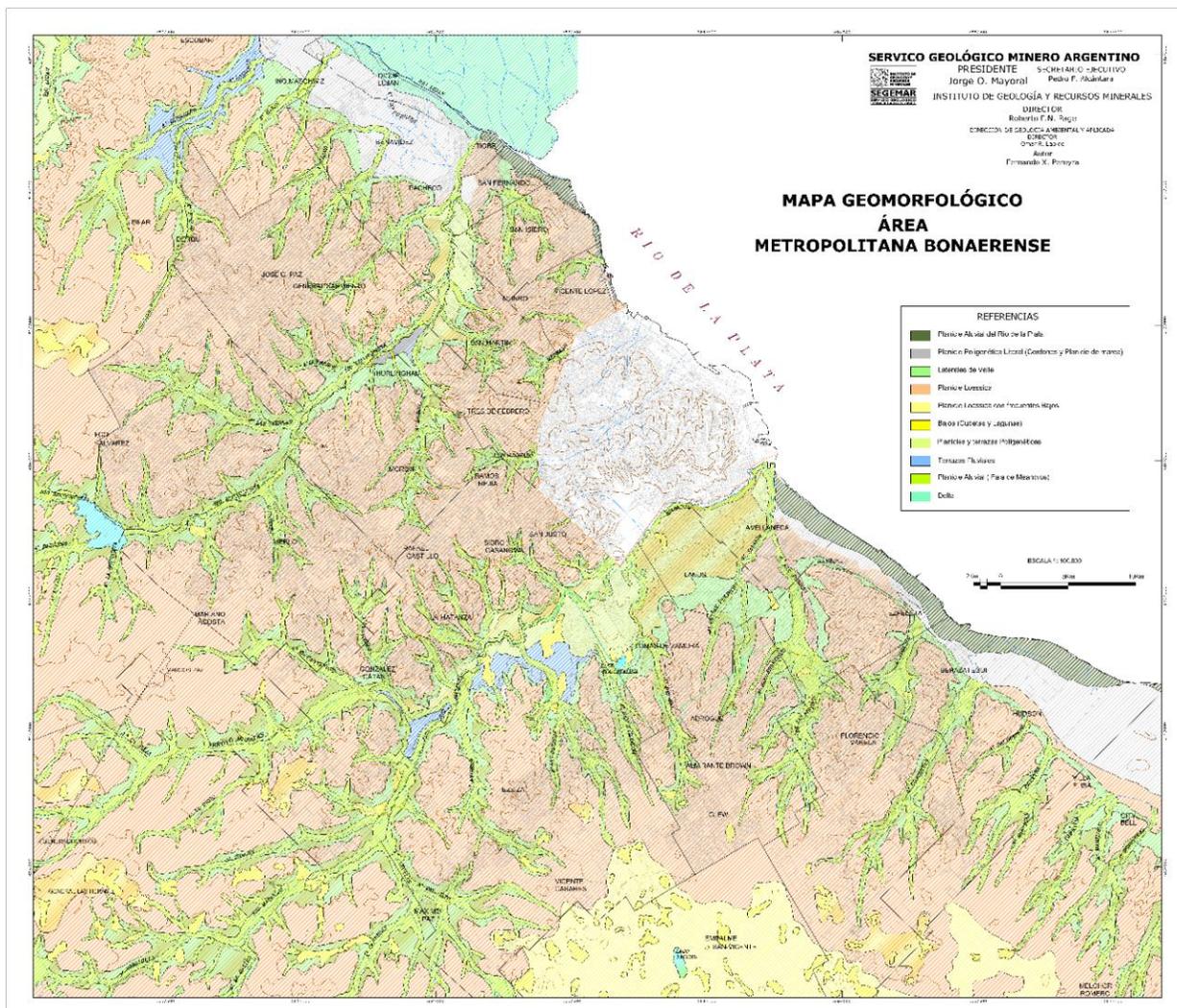


Figura 12.- Geomorfología del AMBA. Fuente: SEGEMAR.

3.1.5.- Condiciones ambientales

La región pampeana es una gran llanura que representa un recurso natural fundamental para el despliegue productivo del país. Se trata de una estepa herbácea con temperaturas benignas para el desarrollo agrícola, lluvias repartidas durante todo el año y suelos profundos con un alto contenido de materia orgánica. En la Provincia de Buenos Aires el potencial productivo del suelo fértil es alto: se encuentran los índices de I a IV definidos por el Servicio de Conservación del Suelo de Estados Unidos (USDA) como recurso natural irremplazable apto para cultivos agrícolas (Fernández et al, 2009).

El “cinturón verde” refiere al espacio periurbano conformado por una trama de quintas o huertas familiares –y otras de características más empresariales- que rodean a las grandes ciudades, cuya producción se destina especialmente a verduras de hoja y hortalizas de

estación. La lógica de localización de estas actividades altamente intensivas en el uso de los factores de la producción (tierra, trabajo y capital) responde a su cercanía geográfica con respecto a los grandes centros urbanos, aprovechando intersticios o zonas de vacancia para establecerse. Desde un punto de vista económico, el “cinturón verde” cumple funciones de abastecimiento alimentario a la población de la ciudad (Di Pace et al, 2004).

La región tiene una singularidad geográfica con un alto valor de “biodiversidad”: encontramos especies, ecosistemas y paisajes de características tropicales y subtropicales en un contexto austral y templado. Aunque es la llanura el paisaje predominante de la región, el encuentro de esta llanura con el sistema fluvial, deltaico y estuarino, origina una diversidad de ambientes con variedad geomorfológica a la que se asocian suelos y vegetación propios, se conjugan ecosistemas de la Selva Austrobrasileña o provincia biogeográfica Paranaense, del Delta, del Espinal y de la regiones Chaqueña y Pampeana (Morello, 2000).

La situación ambiental de la RMBA da cuenta de escenarios actuales y futuros problemáticos. Algunos de los que pueden ser considerados problemas principales y de resolución urgente (Di Pace et al., 2004):

- Carencia de sistemas de agua potable que abastezcan con calidad aceptable y volumen suficiente a la población. Este problema es consecuencia de las conexiones de los sistemas de agua corriente domésticos y/o de los pozos de extracción a acuíferos contaminados por materia orgánica (proveniente fundamentalmente de excretas) y de metales (mercurio, cromo, plomo, etcétera) derivados de efluentes industriales. Cada vez son más los datos empíricos que dan cuenta de contaminación orgánica en el acuífero Puelches (Auge, 2005, González y Hernández, 1997), el más usado para agua de consumo, que se halla entre los 40 m y 70 m, dependiendo de la zona. De lo anterior podemos inferir que la contaminación de los recursos hídricos la RMBA es uno de los principales problemas ambientales, dada la importancia del consumo de dicho recurso para la salud de los habitantes y las actividades productivas de la región.
- Dificultades para la recolección y disposición de los residuos sólidos domiciliarios, patológicos e industriales constituyen el otro gran problema ambiental de la RMBA (Vallejos y Schnake, 2007). Como consecuencia de ello se produce la contaminación de los suelos –por la existencia de basurales a cielo abierto que derivan además, en centros de vectores de enfermedades, como ratones, insectos, microorganismos diversos, etc.–, y la contaminación de las aguas superficiales (arroyos, ríos) y profundas (acuíferos).
- Inundaciones de ciertas áreas (Lecertua et al., 2015; García Rojo et al., 2016; Romanazzi, 2011; Angheben, 2012; UNLP, 2013) como producto del mal manejo del territorio: aumento de las áreas pavimentadas que traen como consecuencia un aumento en el escurrimiento, barreras antrópicas en lugares inadecuados (rutas, canales, defensas o paredones inadecuados de contención, desvío de cuerpos de agua, pavimentación inadecuada de arroyos), ausencia de pluviales, etcétera.
- Contaminación aérea en distintas zonas como consecuencia de la falta de tratamiento de gases industriales y la no aplicación de normas en el parque automotor (González y Sandoval, 2012). Todo el sistema de transporte merece una mirada crítica en la RMBA, no sólo por sus consecuencias contaminantes

sino porque su desarticulada gestión posee un alto impacto negativo sobre la vida cotidiana de millones de sus habitantes.

En todos los casos, estos problemas están significativamente concentrados en la RMBA, en donde un poco menos de cinco de cada diez hogares viven en zonas sin desagües pluviales y tres de cada diez hogares residen en barrios con calles de tierra, próximos a basurales o con calles inundables (Salvia, 2011).

La población en villas y asentamientos en la RMBA está creciendo mucho más aceleradamente que la población total. Entre 1981 y 2006, dicha población creció, en términos relativos, 220 %, frente a un 35 % de incremento poblacional en el conurbano (Suárez, 2011).

La proliferación de estas urbanizaciones en nuestro país, al igual que en varias ciudades del mundo, se incrementó fuertemente en los años noventa. La región metropolitana del gran Buenos Aires ha sido el escenario donde el proceso fue mayor. Se dio una suburbanización de las elites que comenzaron por primera vez a desplazarse hacia las periferias ocupando enclaves territoriales (Suárez, 2011). La incidencia de esta ocupación urbana por la degradación y destrucción del potencial productivo de los sistemas agrícolas y naturales es prácticamente irreversible, especialmente grave para la horticultura de proximidad (Fernández et al., 2009).

3.1.6.- Aspectos socioeconómicos

La estructura urbana del AMBA tiene su origen a partir de la expansión de municipios circundantes al puerto de Buenos Aires, en el cual el ferrocarril fue el elemento principal de conexión entre los centros poblados. Junto a estos y sobre los cursos de agua se localizaron los principales establecimientos industriales. Este proceso se dio en concordancia con las recurrentes inmigraciones sucedidas a fines del siglo XIX. Entre los años 30 y 70, la estructura productiva se localizó en la zona sur de la Ciudad de Buenos Aires y en la primera periferia del AMBA con la presencia de núcleos obreros. En las últimas décadas se produce un cambio en los criterios de localización industrial, con el fin de descentralizar el espacio de la fábrica y distribuirlos en la ciudad. A su vez los sectores más tecnificados tienden a localizarse en parques industriales, sobre el cual es posible un mejor control de las condiciones de producción y ambientales. La zona sur (Avellaneda, Quilmes, Berazategui, Florencio Varela, Lanús, Lomas De Zamora, Almirante Brown, Esteban Echeverría, Ezeiza, Presidente Perón y San Vicente) es el área industrial tradicional del país, donde se instalaron los frigoríficos desde fines del siglo XIX.

La imposibilidad de acceder a una vivienda segura y de contar con otros importantes recursos del hábitat urbano, como lo son la existencia de un entorno ambiental adecuado y el pleno acceso a los servicios básicos de infraestructura urbana, afectan especialmente a los sectores más pobres de la estratificación socioeconómica del AMBA. En general, la zona norte presenta condiciones similares a la de CABA con los menores déficits. Mientras tanto, en la zona oeste y en zona sur es donde se concentran las mayores carencias en materia de acceso a una vivienda adecuada, a infraestructura urbana y a un hábitat saludable.

Se registra que casi un 8% de los hogares y un 13% de la población que reside en el AMBA habitan en viviendas donde se registra la presencia de tres o más personas por cuarto. Un dato especialmente relevante es que casi el 10% de los hogares del AMBA residen en villas o asentamientos precarios. Los hogares del AMBA muestran un riesgo alimentario del 13%, cifra que disminuye a 6% en CABA y aumenta a 16% en el AMBA. De igual manera se ve como el no tener ropa o calzado adecuados afecta más al AMBA (11%) en comparación con CABA (2%). En lo que respecta a la salud un 29% de los hogares del AMBA no cuentan con cobertura

médica, un 20% no asiste al médico y un 19% hace recortes en medicamentos. Esta situación nuevamente es más desfavorable dentro del AMBA donde un 35% de los hogares no cuenta con cobertura médica, un 24% no asiste al médico y un 23% debe realizar recortes en medicamentos. En cuanto a la falta de agua corriente es un problema que afecta a dos de cada diez hogares del AMBA, sin embargo, la mayor carencia a nivel regional es el acceso a cloacas, que afecta a cuatro de cada diez hogares del AMBA (Salvia, 2011).

En este caso, el análisis de la situación laboral de la población adulta de la región del AMBA arroja como resultado que es la población adulta de los estratos socioeconómicos y residenciales más bajos la que presenta mayor riesgo de desempleo recurrente, la que tiene el menor acceso a empleos de calidad, así como también la que tiene el mayor déficit de seguridad social y de satisfacción laboral. Analizando las características de los jefes de hogares a nivel del AMBA, se observa que la mayoría de los hogares tienen jefes varones, de mediana edad, ocupados de manera estable y son argentinos nacidos en el país. Sin embargo, cabe destacar que casi 3 de cada diez hogares cuentan con jefatura femenina; en 3 de cada diez hay un jefe con 60 años o más y que en 2 de cada diez el jefe tiene menos de 35 años; y en uno de cada diez hogares el jefe es nacido en otro país (menos de un 6% en un país limítrofe). También se observa que el 51% de los jefes no tiene secundaria completa, casi un 26% está inactivo en términos laborales, un poco más del 12% de los jefes ocupados tiene una actividad laboral de baja calificación, precaria e inestable, mientras que un 11% es patrón en una empresa o tienen una actividad profesional independiente (Salvia, 2011).

3.2.- Cuenca Sarandí - Santo Domingo

La cuenca Sarandí - Santo Domingo se orienta en sentido sur - norte y es vertiente al Río de la Plata. Es colindante a la cuenca del río Matanza – Riachuelo hacia el oeste y las cuencas de los arroyos San Juan - Jiménez y Las Conchitas al este. Tiene una superficie aproximada de 240 km². El sistema está dividido en dos subcuencas principales: la subcuenca Sarandí, que incluye al arroyo Galíndez y la subcuenca Santo Domingo que incluye a los arroyos Las Perdices, San Francisco y Las Piedras (Lecertua et al., 2015) (Figura 13).

Caracterización del impacto por inundación en una cuenca urbana

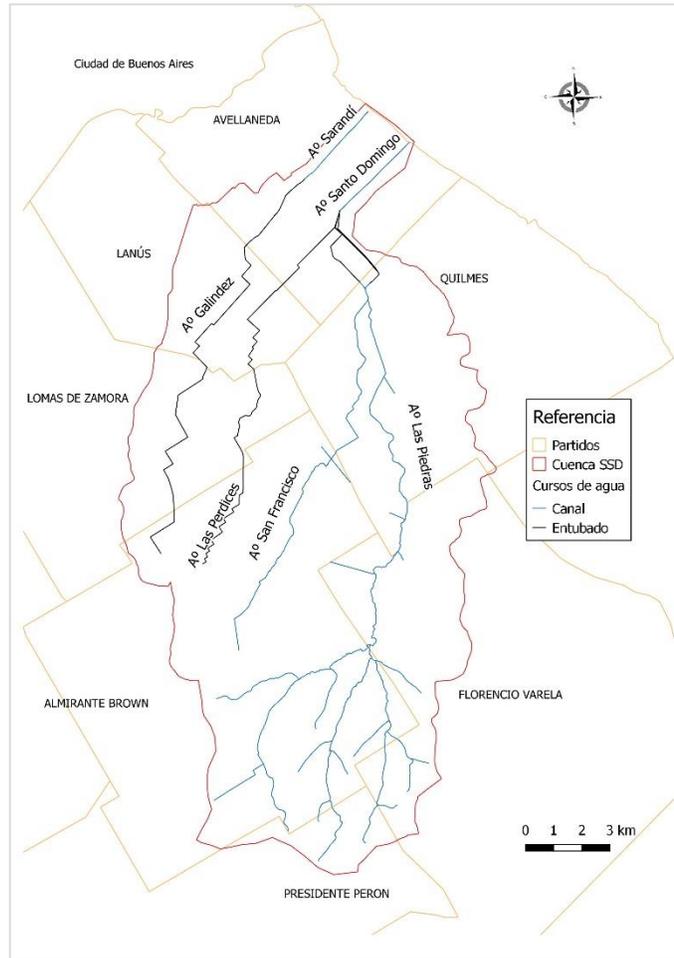


Figura 13.- Cuenca Sarandí – Santo Domingo.

A partir de información disponible en INDEC, 2010 a nivel de radio censal, se estimó con el uso de sistemas de información geográfica la población de la cuenca Sarandí – Santo Domingo, considerando la cantidad de habitantes proporcional al área del radio censal (Tabla 2) (Kazimierski et al., 2015).

Tabla 2.- Estimación de población en bases a datos del INDEC, 2010.

Partido	Población
Avellaneda	162895
Almirante Brown	383299
Quilmes	336960
Florencio Varela	169208
Lomas de Zamora	174906
Lanús	184560
Presidente Perón	1374
Total	1413203

En las proyecciones realizadas en INDEC, 2013 el total de población en la provincia de Buenos Aires es de un 10.5 % más al año 2019. En el caso de los grupos etarios considerados,

los menores a 5 años presentarían un aumento del 4.3 % y los mayores a 65 años un 23.2 %. Según estos datos se podría estimar la población actual de la cuenca Sarandí – Santo Domingo en aproximadamente 1561589 habitantes.

3.2.1.- Subcuenca Sarandí

La cuenca del arroyo Sarandí - Galíndez abarca un área de 43.9 km² comprendiendo los partidos de Almirante Brown, Lomas de Zamora, Lanús y Avellaneda. En el partido de Almirante Brown la cuenca abarca una superficie de 4.7 km² equivalente a un 11 % del total de la cuenca, con las nacientes en la localidad de Adrogué. En el partido de Lomas de Zamora, la cuenca cubre un área de 15.3 km², un 35 % del total de la cuenca dentro de las localidades de Turdera, Temperley, Lomas de Zamora y Banfield. Aguas abajo el arroyo ingresa en el partido de Lanús por la localidad de Remedios de Escalada de San Martín cubriendo además el oeste de Monte Chingolo, Lanús Este y Gerli con un total de 12.8 km². Por último en el partido de Avellaneda, la cuenca cubre un área de 11.1 km² en las localidades de Gerli, Sarandí y la Reserva del Cinturón Ecológico (Lecertua et al., 2015).

La superficie de la cuenca se encuentra completamente urbanizada, a excepción de la zona hacia aguas abajo de la Autopista Buenos Aires – La Plata sobre la Reserva del Cinturón Ecológico. Limita al oeste por el Ferrocarril Roca (Ramal Plaza Constitución – Alejandro Korn) y vierte sus aguas en el Río de la Plata a pocos metros del Polo Petroquímico Dock Sud (Lecertua et al., 2015).

El escurrimiento de la cuenca se encuentra modificado de forma artificial. Naturalmente se extendía hasta las proximidades de la localidad de Longchamps, en el partido de Almirante Brown, donde nacía el curso con el nombre de Arroyo de las Perdices; recién después de recibir como afluente al Arroyo Galíndez a la altura de Lanús donde se convertía en el Arroyo Sarandí hasta su desembocadura en el Río de la Plata (Lecertua et al., 2015).

Mediante la obra denominada “Saneamiento de la Cuenca del Arroyo Sarandí y Santo Domingo, 2° Etapa – Desviación y Entubamiento del Arroyo Las Perdices” el Arroyo Las Perdices fue entubado y conectado con el Arroyo Santo Domingo, modificando el sistema de cuencas. No se sabe con exactitud la fecha de esta obra, pero se estima que fue durante las décadas del 60 o 70. En esta nueva situación, el Arroyo Galíndez y el Arroyo Sarandí forman un único cauce con su nacimiento en el partido de Almirante Brown luego del cruce de los ferrocarriles Roca (Ramal Plaza Constitución – Alejandro Korn) y Sarmiento (Ramal Temperley - Haedo) en la estación de Temperley. Todo este sistema se encuentra entubado desde sus nacientes hasta el cruce con el Ferrocarril Roca (Ramal Plaza Constitución – La Plata). Luego se encuentra rectificado y a cielo abierto (Canal Sarandí) hasta su desembocadura. La longitud de su cauce principal es de aproximadamente 21 km (Lecertua et al., 2015).

3.2.2.- Subcuenca Santo Domingo

La subcuenca del arroyo Santo Domingo comprende una superficie de aproximadamente 200 km², con una extensión del cauce principal de aproximadamente 23 km. Abarca parte de los partidos de Avellaneda, Quilmes, Lanús, Lomas de Zamora, Almirante Brown, Florencio Varela y Presidente Perón. El tramo principal es el arroyo Las Piedras, sus nacientes son tres arroyos a cielo abierto de escasas dimensiones en la zona de cultivos de la localidad de Ministro Rivadavia, partido de Almirante Brown. El cauce toma importancia en el ingreso de la localidad de Gobernador Julio A. Costa, partido de Florencio Varela, donde recibe las aguas del desagüe del barrio Don Orione, paralelo a las vías del Ferrocarril Roca. Continúa hacia aguas abajo atravesando las localidades de San Francisco Solano, Villa La Florida,

Quilmes Oeste y Bernal Oeste (Tabla 3). Luego de recibir como único afluente de importancia al arroyo San Francisco, penetra en una antigua zona de bañados (cañada de Gaete), se bifurca en un curso natural y otro artificial, entra nuevamente en una zona de bañados (cerca de Villa Gonnet), continuando luego hasta verter sus aguas en el Santo Domingo, que se encuentra canalizado. A lo largo de toda su traza permanece a cielo abierto, parcialmente rectificando en algunos tramos y de dimensiones variables. El arroyo Las Perdices, originariamente de la subcuenca del arroyo Sarandí, se encuentra interconectado al canal Santo Domingo mediante un sistema de conductos rectangulares (Lecertua et al., 2015).

Tabla 3.- Partidos ubicados en la cuenca Sarandí – Santo Domingo.

Partido	Localidades	Área de la cuenca	Porcentaje
Avellaneda	Wilde, Villa Domínico y Sarandí	13.8	7
Quilmes	San Francisco Solano, Villa La Florida, Quilmes Oeste y Bernal Oeste	41.9	21
Lanús	Monte Chingolo, Lanús Este, Remedios de Escalada de San Martín y Gerli	7.8	4
Almirante Brown	Don Orione, Longchamps, Burzaco, Malvinas Argentinas, Rafael Calzada, Claypole, Glew, San Francisco Solano, Ministro Rivadavia y San José	81.8	42
Florencio Varela	Florencio Varela, Gobernador Julio Costa, Villa Santa Rosa, Villa Brown y Villa Vatteone	33.6	17
Lomas de Zamora	Temperley, Banfield y Lomas de Zamora	9.5	5
Presidente Perón	Presidente Perón	7.8	4

3.2.3.- Cambios en el ambiente urbano

Toda cuenca urbana ha sido en algún momento de la historia una cuenca rural, con lo cual pueden considerarse las cuencas urbanas como el efecto de una continua perturbación debido al impacto sobre el ambiente natural provocado por los procesos dinámicos de urbanización llevados a cabo por el hombre.

La urbanización trae consigo una variedad de desafíos ambientales tanto para el entorno local, regional y más amplio como resultado directo de los cambios bioquímicos y físicos en sistemas hidrológicos (Fletcher et al., 2013; Jacobson, 2011). La pérdida en superficies permeables reduce la infiltración en los suelos, mientras la introducción de drenaje artificial reemplaza las vías naturales. Esta combinación generalmente se considera que tiene un efecto considerable en la respuesta hidrológica de un área a las precipitaciones, como: más rápida respuesta (Huang et al., 2008), mayor magnitud de caudales en ríos (Hawley y Bledsoe, 2011), alta recurrencia de pequeñas inundaciones (Hollis 1975; Braud et al., 2013), reducción de caudal base y recarga subterránea (Simmons y Reynolds, 1982).

Las modificaciones fundamentalmente se manifestaron y manifiestan en cambios en la superficie de la cuenca y las vías de escurrimiento natural del flujo. La impermeabilización de parte de la superficie de la cuenca implica reducción en áreas de infiltración, con lo que aumenta el escurrimiento superficial y se reduce la infiltración, la percolación y el escurrimiento sub-superficial y subterráneo (Figura 14). Todas las acciones de suavizado de la superficie como pavimentaciones, nivelaciones, etc. (que implican una disminución importante de la resistencia al flujo) y las redes artificiales de drenaje aceleran el flujo; puede en algunos casos existir la alternativa de retardo y amortiguamiento debido a terraplenes de defensa, rutas, embalses de retención, etc.

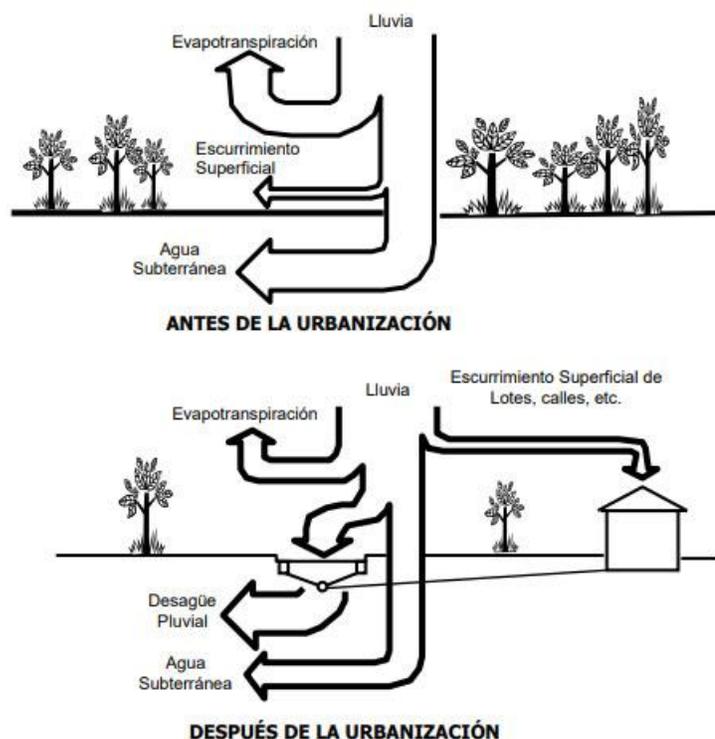


Figura 14.- Cambio en el balance hidrológico de una cuenca urbana.

La cuenca Sarandí – Santo Domingo posee un sistema de drenaje urbano que se encuentra ubicado en una zona muy poblada y de importante desarrollo industrial, recibiendo además de los aportes pluviales, efluentes domiciliarios, cloacales e industriales, por lo cual el agua conducida posee niveles altos de contaminación (PROMEBA, 2002; Angheben, 2012; Efron et al. 2014).

Una problemática ambiental de importancia en la cuenca Sarandí – Santo Domingo es la presencia de residuos sólidos urbanos en el territorio y en los cursos de agua (Figura 15). Esta situación dificulta el escurrimiento del agua por la reducción de la sección en los arroyos, intensificando las consecuencias producto de inundaciones urbanas. La problemática aquí planteada presenta una gran complejidad que no es abordada en el presente trabajo, e incluye desde la falta de desarrollo de un plan integral de manejo de residuos sólidos hasta la formación de agentes sociales claves como son los carreros quienes arrojan gran parte de los residuos que gestionan directamente en los arroyos.



Figura 15.- Presencia de residuos sólidos urbanos, arroyo San Francisco.

3.3.- Modelación hidrológica hidráulica de la cuenca Sarandí - Santo Domingo

En términos básicos los modelos hidrológicos – hidráulicos urbanos requieren dos conjuntos de datos: una descripción de la precipitación, la cual es la principal forzante del sistema; y una descripción del sistema físico; topografía, red de calles y arroyos y sistema de alcantarillado (Re et al., 2018). Una adecuada representación de los elementos constituyentes del sistema urbano permite caracterizar en detalle las variables involucradas en los procesos de inundaciones urbanas.

3.3.1.- Eventos de precipitación considerados

Para el abordaje del estudio de las inundaciones urbanas en esta cuenca se seleccionaron dos eventos de precipitación extremos extraordinarios sucedidos en la región: el ocurrido el 31 de mayo de 1985 en la Ciudad de Buenos Aires (BSAS1985) con un total de 307 *mm* acumulados en 20 horas y el 02 de abril de 2013 en la ciudad de La Plata (LP2013) con 392 *mm* acumulados en 20 horas (SMN, 2013; UNLP, 2013). Como se observa en la Figura 16 se trata de eventos de diferente intensidad de precipitación, siendo representativas de forzantes diferenciales.

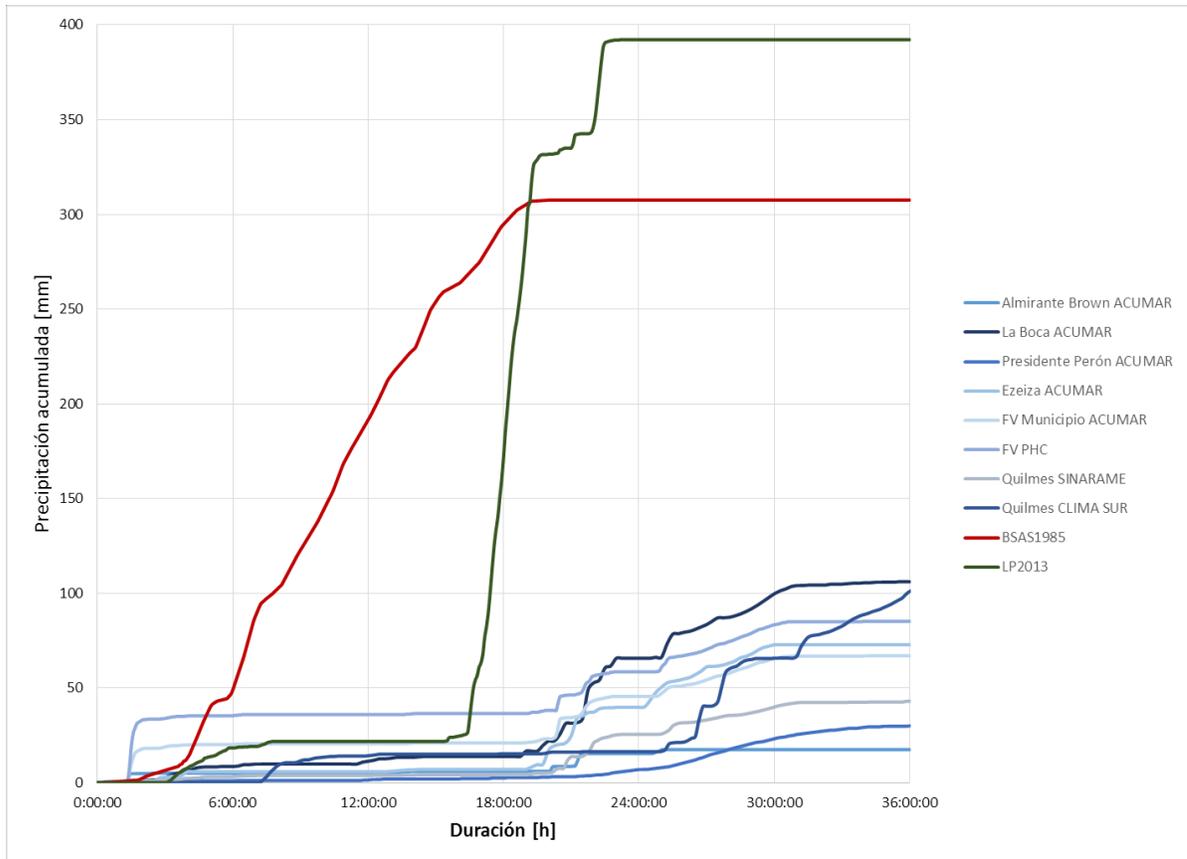


Figura 16.- Eventos de precipitación estudiados.

Por otra parte se consideró el análisis de los impactos producidos por el evento del 28 y 29 de abril de 2018 (SSD2018) con 106 mm acumulados registrados por las estaciones La Boca – Acumar y Quilmes – Clima Sur. El evento fue captado por el sensor de nivel instalado en la cuenca Sarandí – Santo Domingo generando impactos en diferentes puntos de la región (anegamiento de calles, ingreso de agua a viviendas, problemas en servicios públicos y destrozos en espacios públicos).

3.3.2.- Implementación del modelo hidráulico – hidrológico

Se utilizó una versión personalizada del modelo de código abierto EPA – SWMM v5.12 (Storm Water Management Model; US Environmental Protection Agency), que modela todos los procesos requeridos para este problema. EPA – SWMM contiene módulos que abordan procesos claves del ciclo hidrológico. Los módulos de escorrentía y transporte fueron usados para simular el flujo de aguas pluviales en el sistema de drenaje dual de la cuenca Sarandí – Santo Domingo.

Para hacer frente a la naturaleza de alta resolución del enfoque de modelación seleccionada, se desarrolló una metodología automática para la implementación del modelo en el software EPA – SWMM. Una herramienta de preprocesamiento y posprocesamiento de código abierto, llamada *Conupy* (disponible en <http://gitlab.com/nicolas-d-badano/conupy>), que consiste en una colección de funciones de Python que transforma datos georreferenciados desde un entorno GIS y automáticamente construye el esquema discreto para la modelación en EPA – SWMM (Figura 17). Esta actividad incluye la discretización de las redes de calles, canales y conductos, con sus secciones transversales y parámetros apropiados, la creación de

interconexiones entre ellos y de subcuencas para cada nodo, la asignación de parámetros hidrológicos basados en datos geográficos y la interpolación de series temporales de lluvia para cada subcuenca usando diferentes algoritmos. Las rutinas de Python usan un respaldo GIS para cálculos geográficos; QGIS es el principal entorno de desarrollo para este propósito.

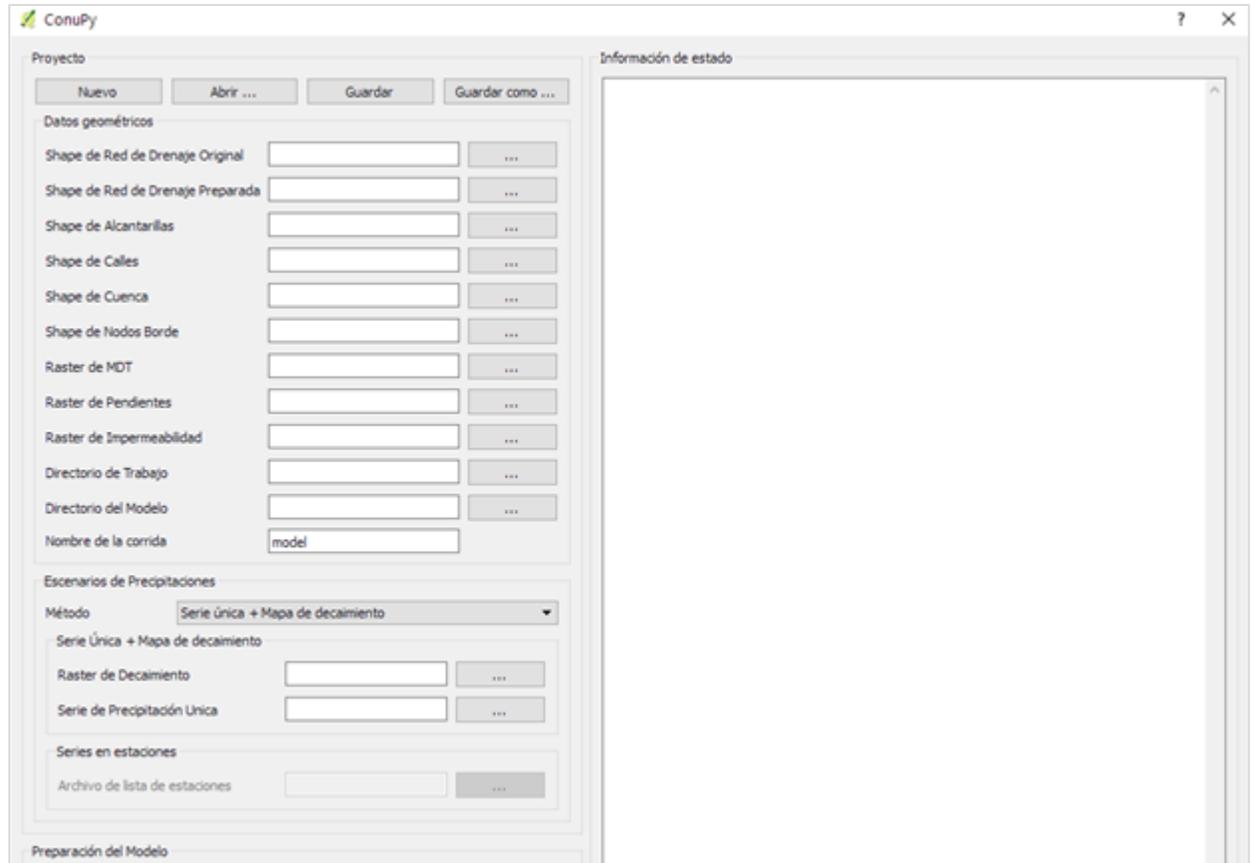


Figura 17.- Software de pre y post procesamiento ConuPy.

Entre los datos georreferenciados requeridos por *ConuPy* se encuentran los archivos vectoriales (típicamente en formato ESRI Shape File) representando las redes de calles, canales y conductos, los límites de la cuenca y la condición de borde de salida, y archivos raster representando el MDT, pendiente del terreno e impermeabilidad (Figura 18).

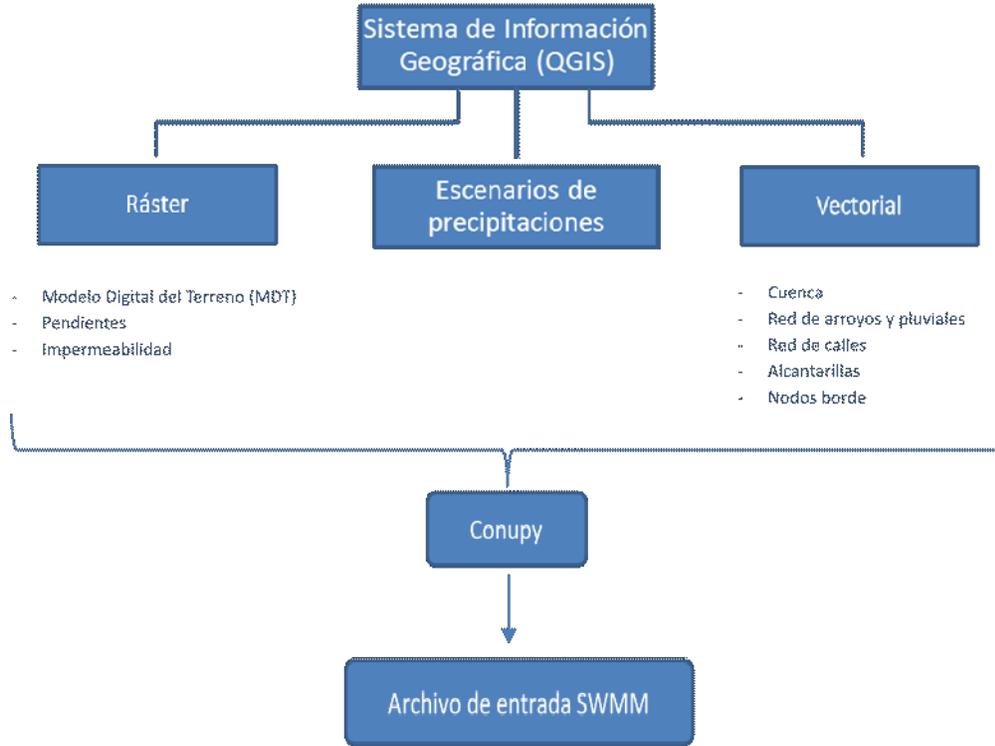


Figura 18.- Esquema de modelación.

La precipitación puede especificarse como estaciones puntuales (en cuyo caso fueron interpoladas a cada subcuenca usando el algoritmo Inverse Distance Weighted) o datos en grilla, con funciones especiales para simular tormentas móviles o decaimiento areal.

EPA – SMWW conceptualiza las subcuencas como áreas rectangulares con pendientes uniformes y un ancho determinado que drenan hacia un único nodo de salida. Estas subcuencas son consideradas como reservorios no lineales, en la cual se genera escorrentía a partir de la diferencia de los flujos de entrada y salida por unidad de tiempo. Las redes de calles y desagües pluviales son discretizadas usando un paso espacial especificado por el usuario. Los nodos de superficie resultantes se tratan como nodos de almacenamiento, con una curva altura – área que representa el volumen acumulado en cada uno de ellos. En la Tabla 4 se muestran elementos que constituyen el modelo hidrológico e hidráulico que se construyó.

Tabla 4.- Estructura del modelo hidrológico – hidráulico.

Elementos constitutivos	Cantidad
Estaciones pluviométricas	128
Subcuencas	54430
Nodos de unión	11004
Nodos de almacenamiento	52368
Conductos	75869
Orificios	11134
Vertederos	873
Nodos de salida	2

El software EPA - SWMM puede resolver las ecuaciones completas 1D de Saint – Venant, esta aproximación permite resolver fenómenos como la acumulación del fluido en puntos bajos, la aparición de remansos, el trasvase entre cuencas vecinas o el flujo a presión, procesos que pueden presentarse ante forzantes como eventos extremos extraordinarios. Para el caso de la infiltración de áreas permeables se eligió el método de Horton.

3.3.2.1.- Precipitaciones

Para la implementación del modelo hidráulico – hidrológico se trabajó con una serie de precipitaciones ocurridas en la región entre fines de septiembre de 2017 y fines de abril de 2018, las cuales fueron captadas por una red de pluviómetros de medición continua (Figura 19). La serie temporal se discretizó cada 10 minutos, con el fin de homogeneizar los datos presentes (Tabla 5).

Tabla 5.- Pluviómetros utilizados

Estación	Red pluviométrica	Latitud	Longitud	Registro
La Boca	ACUMAR	34°38'11.99" S	58°21'28.99" O	15 min
Ezeiza	ACUMAR	34°51'18.56" S	58°35'80.44" O	15 min
Florencio Varela - Municipio	METEOVARELA	34°48'14.40" S	58°15'57.59" O	10 min
Florencio Varela - La Capilla	METEOVARELA	34°55'19.19" S	58°15'57.59" O	10 min
Almirante Brown	ACUMAR	34°47'51.12" S	58°23'17.13" O	10 min
Presidente Perón	ACUMAR	34°56'47.42" S	58°22'51.40" O	10 min
Quilmes	SINARAME	34°42'21.23" S	58°14'29.40" O	10 min
Quilmes	Particular	34°44'41.99" S	58°14'53.00" O	10 min
Padre Mugica	INA - METEOVARELA	34°48'32.01" S	58°18'47.96" O	5 min

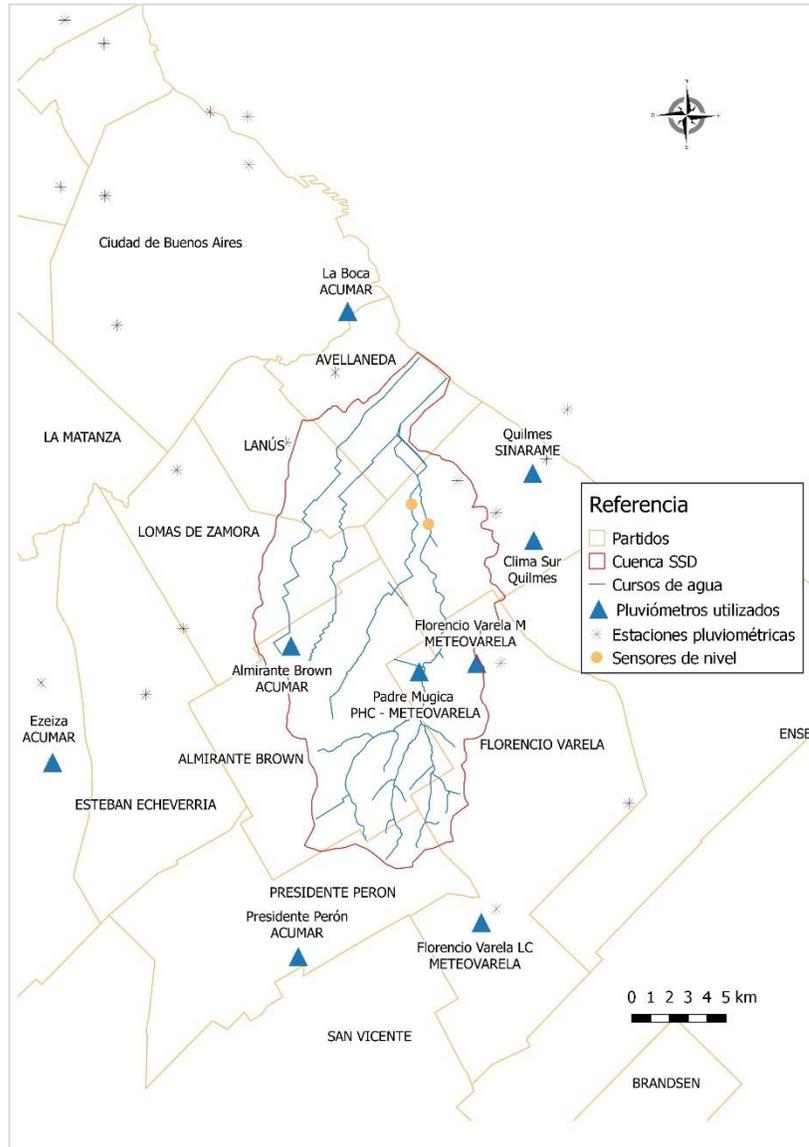


Figura 19.- Instrumental hidrométrico utilizado.

Para la representación espacial y temporal de la lluvia se interpoló con la técnica de la inversa de la distancia (IDW) la serie de registros cada 10 minutos de las estaciones utilizadas, para cada evento de precipitación, a una grilla representativa del área de la cuenca Sarandí – Santo Domingo con celdas de 2500 m (Figura 20).

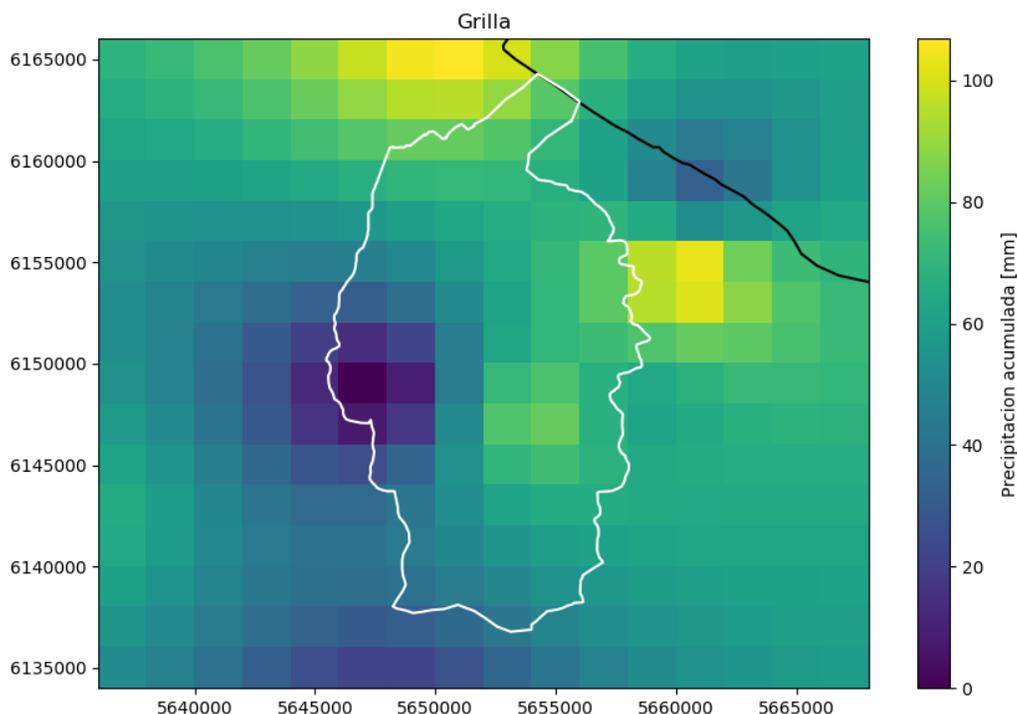


Figura 20.- Valores acumulados de precipitación del evento del día 28 de abril de 2018.

3.3.2.2.- Modelo digital del terreno

La fotogrametría es la disciplina encargada de la ubicación espacial de objetos que se encuentran sobre la superficie terrestre a partir de la captura de fotografías o imágenes a bordo de aviones o vehículos aéreos no tripulados. El Instituto Geográfico Nacional (IGN) viene desarrollando vuelos fotogramétricos desde principios del siglo XX buscando mejorar constantemente la cartografía del territorio argentino.

Para el desarrollo del MDT se utilizó como imagen base una ortofotografía de resolución espacial de 5 m obtenido a partir de un vuelo fotogramétrico del año 2013 realizado por el IGN en el marco del Plan de Cubrimiento Aerofotográfico 2015.

En primera instancia se realizó una extracción automática de curvas de nivel cada 1.25m con el software QGIS a partir de la nube de puntos del raster pertinente (Figura 21). De ésta forma se extrajeron las curvas principales correspondientes a cada cota, sobre las cuales se realizó una simplificación de geometrías a través de la herramienta *simplify geometries* de QGIS. A partir de allí, se realizaron ajustes manuales de acuerdo a lo observado en la imagen. Posteriormente se editaron las tablas de atributos de los shapes generados asignándose atributos referidos a la identidad y la cota de cada curva de nivel. Se unieron los shapes individuales con la función *Merge Shapefiles to One* de QGIS, obteniéndose un shape único de curvas de nivel. Este shape fue utilizado para realizar la interpolación a partir de la función *Topo to Raster* de ArcGIS con un tamaño de celda de 50 m. obteniéndose el MDT en formato raster (Figura 24). Por último se realizó un recorte con la función *clipper* de QGIS utilizando como máscara la cuenca Sarandí - Santo Domingo.

A su vez se compararon los insumos utilizados en la fotogrametría con respecto a las curvas IGN y los productos resultantes de ambos (Figura 22 y 23).

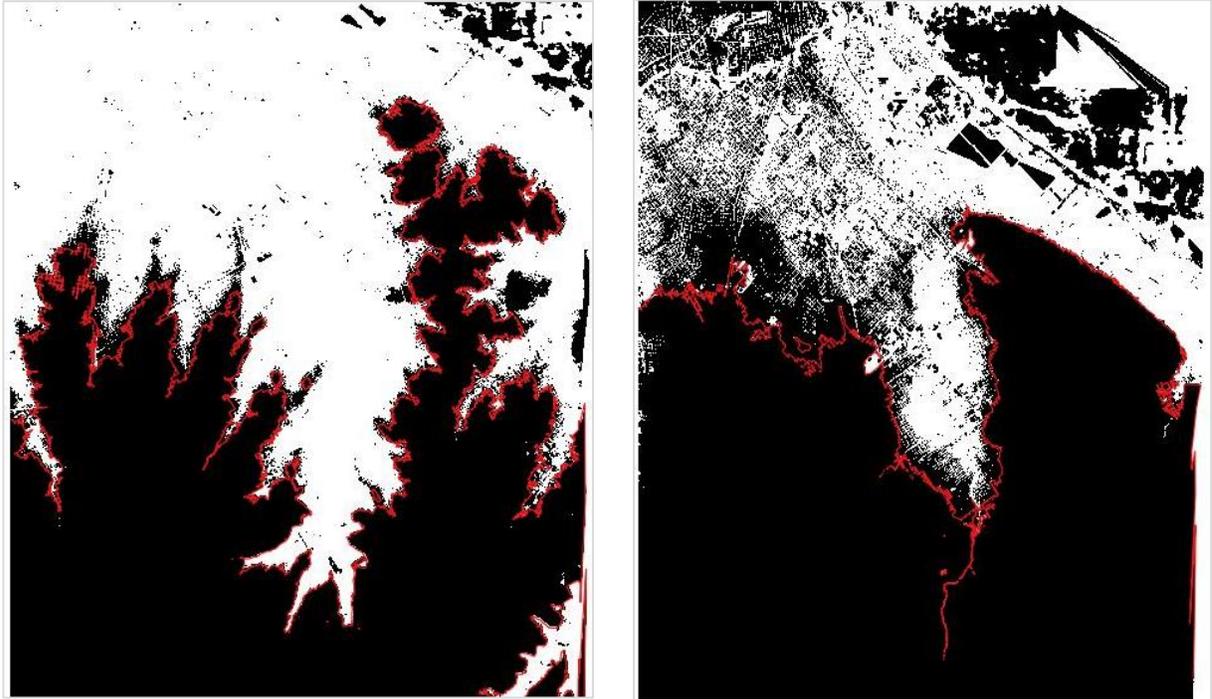


Figura 21.- Extracción de curva de nivel principal para una cota de 17.50 y 8.75 m respectivamente, a partir de la nube de puntos.

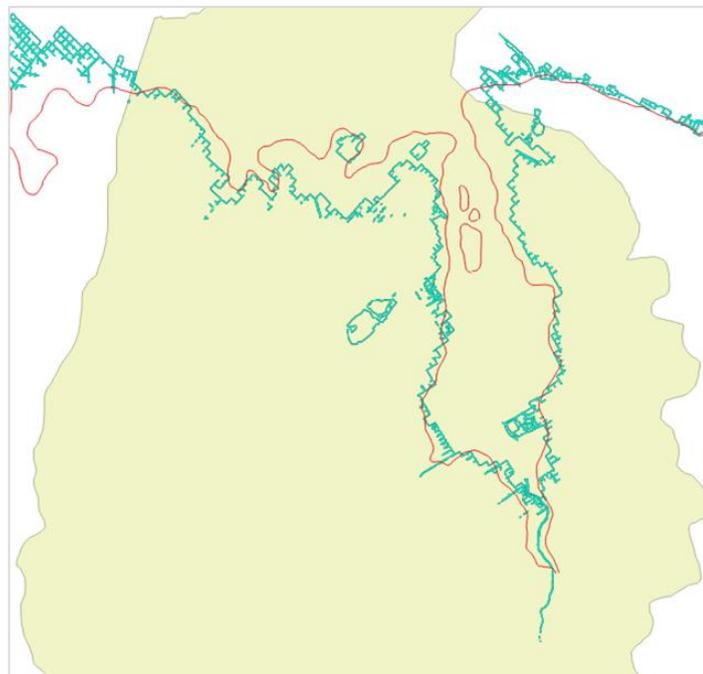


Figura 22.- Comparativa curvas de nivel IGN (rojo) y vuelo fotogramétrico (verde) para cota de 6.25m.

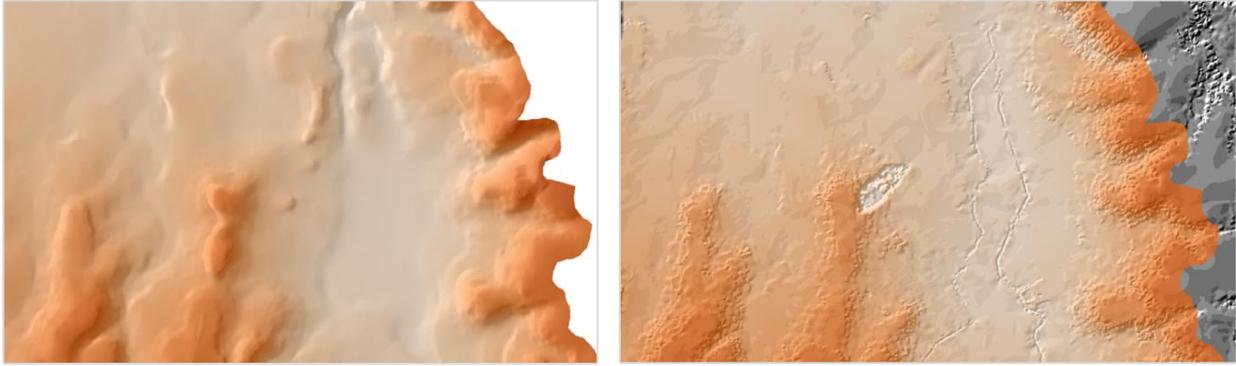


Figura 23.- MDT construido a partir de curvas de nivel IGN (izquierda). MDT construido a partir de vuelo fotogramétrico (derecha).

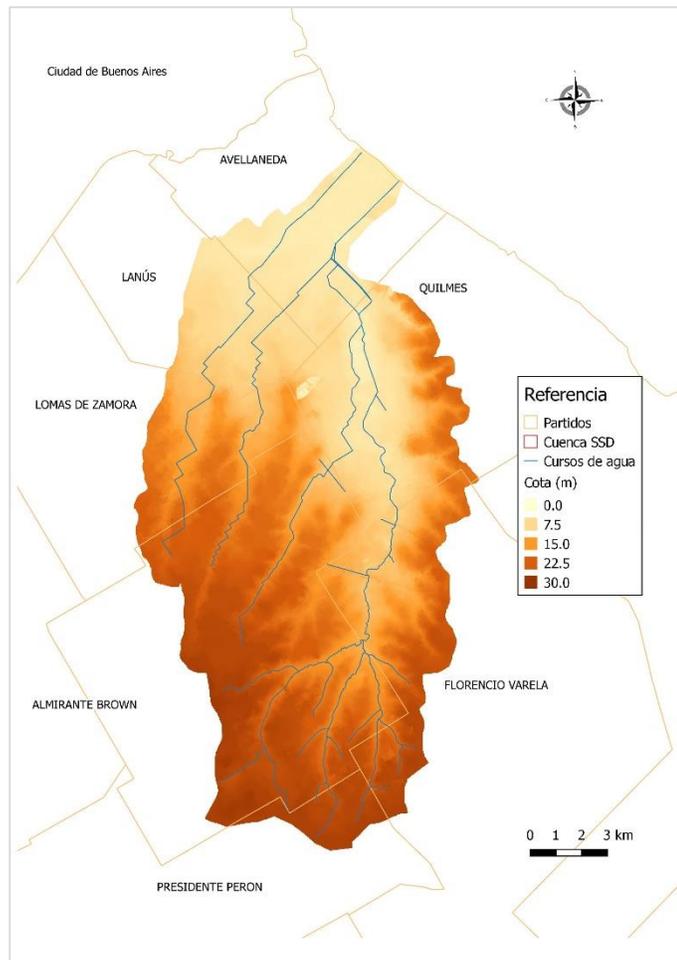


Figura 24.- Raster modelo digital del terreno generado.

La pendiente del terreno se obtuvo a partir del modelo digital del terreno previamente generado a través de la herramienta *terrain analysis - slope* de QGIS obteniéndose valores entre 0.01 y 1 %.

3.3.2.3.- Cobertura de suelo

Se procedió a la estimación de las áreas de la cuenca Sarandí - Santo Domingo que se encuentran impermeabilizadas y aquellas no impermeabilizadas, con el fin de generar un raster con diferentes atributos (Figura 25).

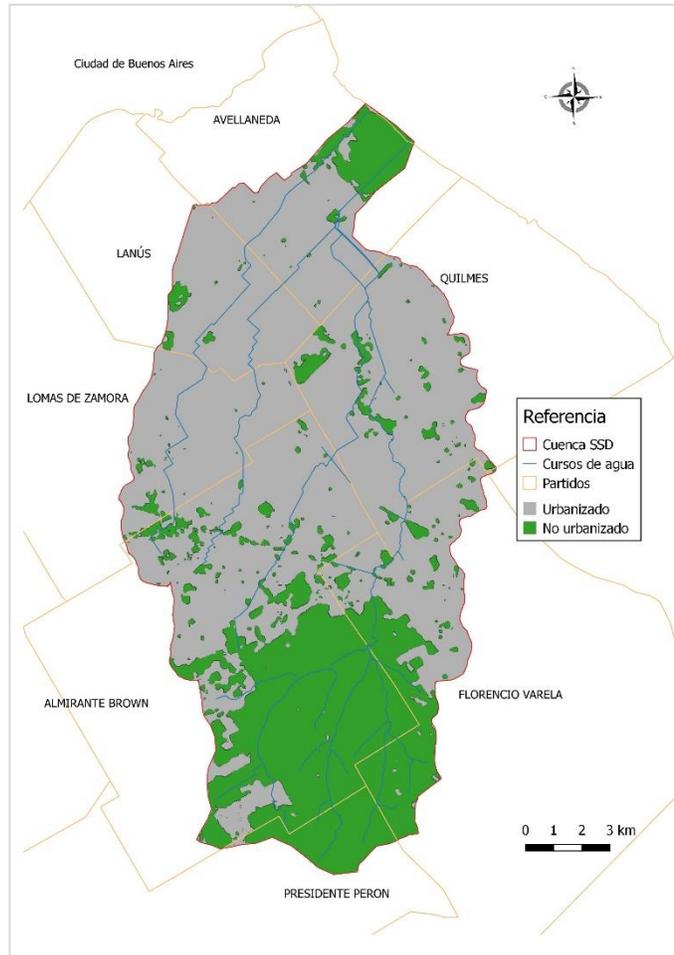


Figura 25.- Mapa de impermeabilidad.

Se trabajó con una imagen satelital Landsat 8 OLI del 8 de junio del año 2016. Para su procesamiento se utilizó el complemento Semi - Automatic Classification Plugin (Congedo et al., 2013) para QGIS. Se apilaron las bandas correspondientes a la imagen satelital, y se transformó la imagen resultante a valores de reflectancia aplicándose a su vez corrección atmosférica. Se crearon las áreas de entrenamiento, generándose dos macroclases; áreas impermeabilizadas y no impermeabilizadas. Se procedió seleccionando una gran cantidad de áreas de modo que sean homogéneas y representativas del territorio de la cuenca en estudio. Una vez generadas las áreas de interés se procedió a la clasificación supervisada automática utilizando el algoritmo *Spectral Angle Mapping*.

La clasificación supervisada consiste en la creación de áreas de entrenamiento a priori conocidas, las cuales se digitalizan a través de ROIs (áreas de entrenamiento) generando diferentes polígonos de acuerdo a la discretización de zonas deseadas, en este caso, zonas permeables e impermeables. Estas deben ser áreas lo más homogéneas posibles y en las que se supiera lo que había el día que se tomó la imagen.

Se realiza un cubrimiento homogéneo con áreas de entrenamiento de la imagen satelital con las clases seleccionadas y se procede a elegir un algoritmo de clasificación, en este caso se seleccionó Spectral Angle Mapper ya que se verificó que diferenciaba las áreas con mayor discretización de manera fidedigna y dada la reflectancia disímil entre las dos clases estudiadas. Las clases se clasifican de acuerdo a las diferentes firmas espectrales que reproducen.

Spectral Angle Mapper se trata de un algoritmo sencillo basado en la medida de la similitud espectral entre dos espectros. Esta similitud espectral, α , se obtiene considerando cada espectro como un vector en un espacio n-dimensional. Un ángulo α pequeño indica elevada similitud entre los espectros, mientras que ángulos elevados indican baja similitud. Donde n es el número de bandas espectrales y t_1 y r_2 son los dos espectros que se están comparando. Las variables descriptas están definidas por la siguiente expresión: (Rashmi, 2014)

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{\sum_{i=1}^{nb} t_i r_i}{\left(\sum_{i=1}^{nb} t_i^2 \right)^{1/2} \left(\sum_{i=1}^{nb} r_i^2 \right)^{1/2}} \right)$$

La implementación del método de clasificación basado en Spectral Angle Mapper se compone de las dos partes siguientes:

- En primer lugar, en la etapa de entrenamiento, se deben obtener espectros de referencia tanto de la materia prima deseada como de los elementos espurios.
- En la etapa de test, se clasifica una imagen desconocida. Para ello se calculan las similitudes espectrales entre los espectros de cada una de las posiciones espaciales de la línea de imagen de test y el espectro de referencia de la materia prima deseada, y entre los espectros de test y el espectro de referencia de los materiales espurios o defectos.

3.3.2.3.1.- Grado de urbanización

Se trabajó con la técnica de clasificación supervisada de imágenes satelitales para la caracterización de áreas impermeables a lo largo del tiempo (Tabla 6). Para ello se definió dos clases principales: zonas permeables y no permeables. En el caso de la cuenca Sarandí – Santo Domingo al ser una cuenca urbana de gran tamaño se trabajó con 50 puntos de control distribuidos homogéneamente.

Tabla 6.- Imágenes satelitales utilizadas.

Código de imagen	Fecha	Satélite	Sensor
LM52250841985337AAA03	03/12/1985	Landsat 5	MSS (Multispectral Scanner System)
LT52250841995365CUB00	31/12/1995	Landsat 5	TM (Thematic Mapper)
LT52250842005312COA00	02/11/2005	Landsat 5	TM (Thematic Mapper)

Caracterización del impacto por inundación en una cuenca urbana

LC82250842016311LGN01	06/11/2016	Landsat 8	OLI (Operational Land Imager)
-----------------------	------------	-----------	-------------------------------

A partir del procesamiento de imágenes satelitales, se observa que el proceso de urbanización en la cuenca Sarandí – Santo Domingo, en los últimos 30 años, se dio principalmente con el aumento de loteos en la cuenca alta y en la confluencia de los arroyos San Francisco y Las Piedras (llanura de inundación, Figura 26), presentando las cuencas Sarandí y Santo Domingo porcentajes de impermeabilidad de 65 % y 87 % respectivamente al año 2016 (Figura 27).

Caracterización del impacto por inundación en una cuenca urbana

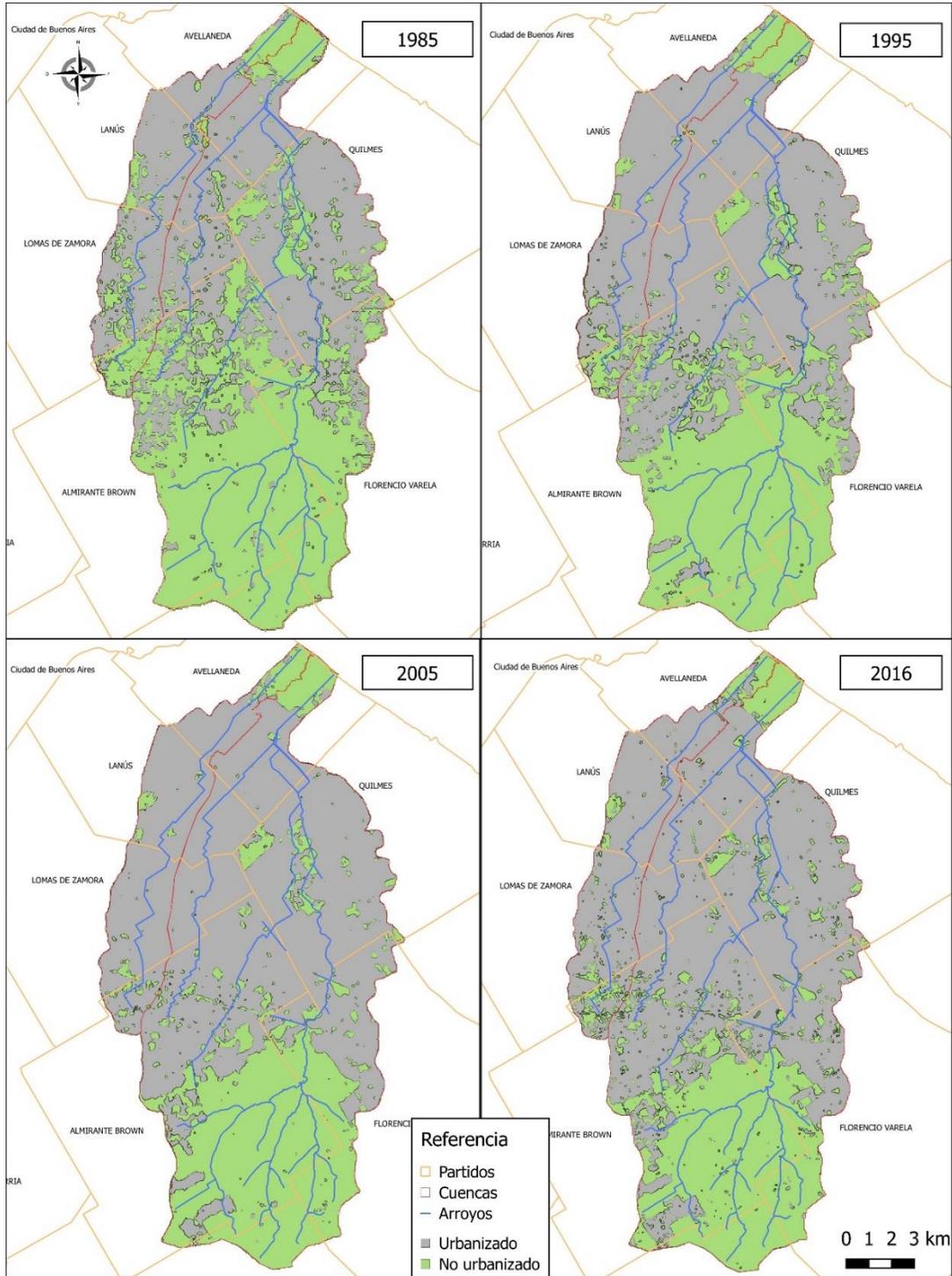


Figura 26.- Áreas permeables e impermeables resultantes de la clasificación.

Caracterización del impacto por inundación en una cuenca urbana

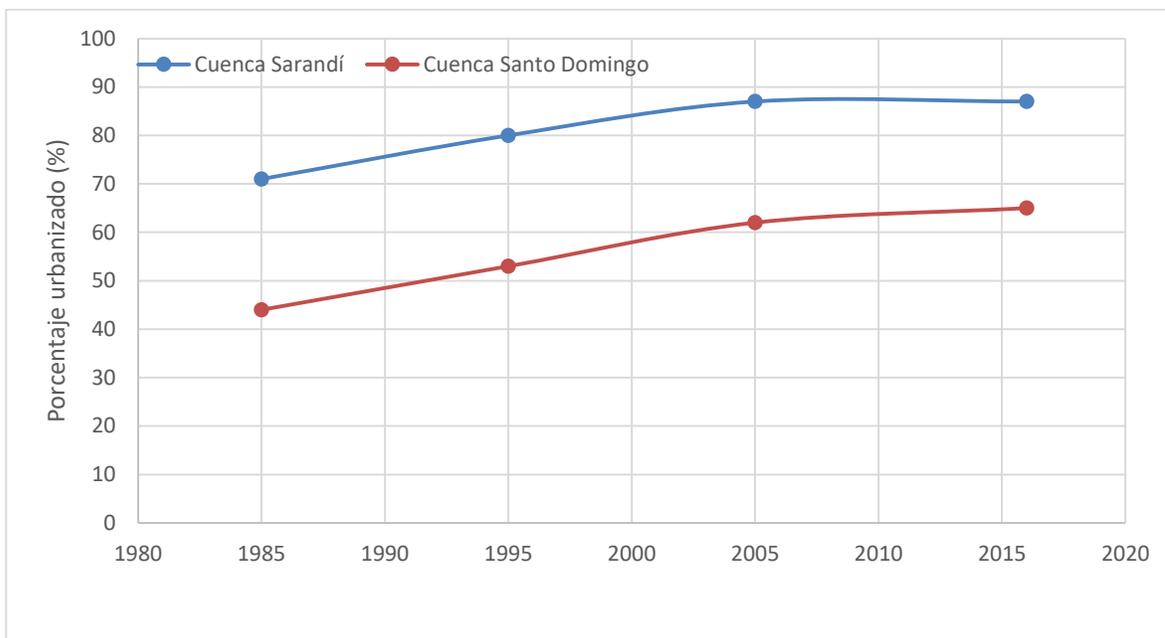


Figura 27.- Porcentaje de impermeabilización a lo largo del tiempo.

Se analizó la información a escala de partido administrativo observándose que los partidos Avellaneda, Quilmes, Lomas de Zamora y Lanús en el área de la cuenca aumentaron muy poco su grado de urbanización en los últimos 30 años, en tanto Florencio Varela y Almirante Brown aumentaron aproximadamente un 100 % sus áreas urbanizadas en ese mismo lapso de tiempo. El partido de Presidente Perón es un caso atípico de la situación observada manteniéndose su área con escasa urbanización siendo baja el área abarcada en la cuenca Sarandí – Santo Domingo (Figura 28).

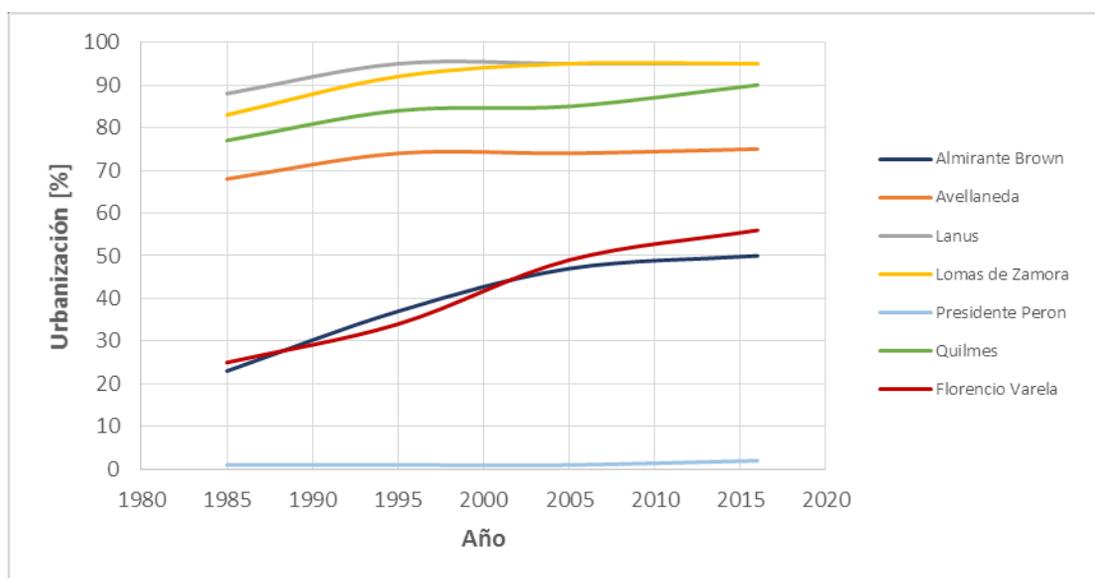


Figura 28.- Urbanización a escala de partido administrativo.

Caracterización del impacto por inundación en una cuenca urbana

Dada la dinámica de crecimiento de villas y asentamientos informales y que estas suelen desarrollarse en zonas de alta amenaza por inundaciones urbanas, se comparó temporalmente la urbanización en la confluencia de los arroyos San Francisco y Las Piedras (Figura 29a). A su vez se constata el crecimiento en vertical de estos asentamientos, como se observa en la Figura 29b correspondientes al año 2017 y 2019 respectivamente.



a)



b)

Figura 29 .- a)- Avance de urbanización, 2010 y 2019 respectivamente, b)- Crecimiento en vertical de asentamientos 2017 y 2019 respectivamente.

3.3.2.4.- Sistema dual de drenaje

El sistema de drenaje mayor está conformado por los cauces superficiales de los arroyos y la red de calles representados a través de shapels de polilíneas con sus respectivos atributos topológicos, las cuales se conectan a los nodos de superficie (Figuras 30 y 31). La fuente del cual se obtuvieron fueron; el Ministerio de Infraestructura y Servicios Públicos de la provincia de Buenos Aires en el caso de la red de calles y la digitalización a través de la ortofotografía del IGN en el caso de los arroyos presentes con apoyo de información de diferentes fuentes oficiales en el caso de sus tramos entubados.

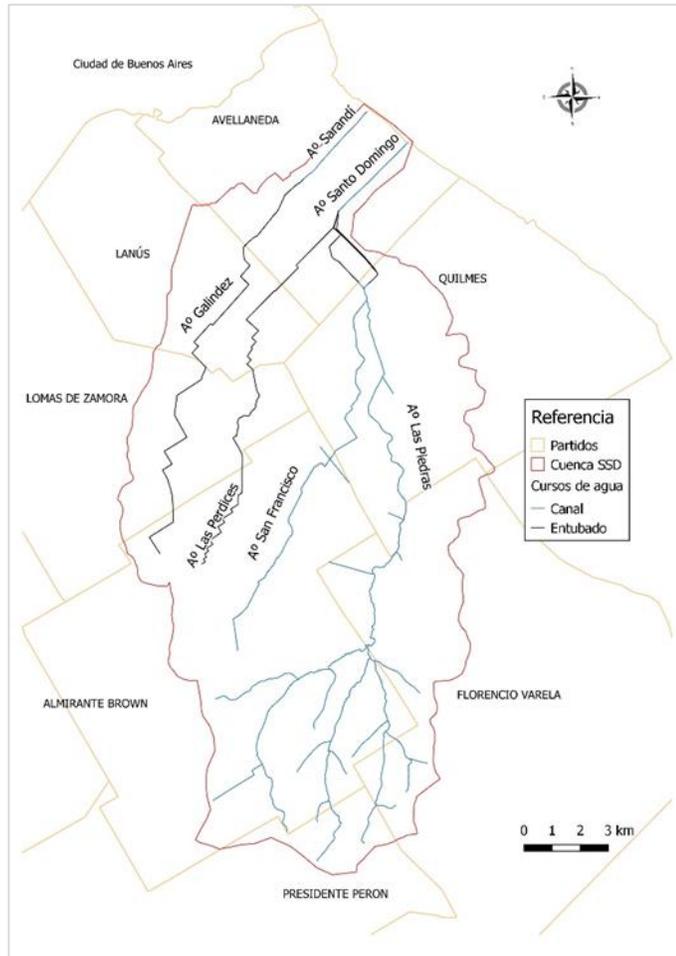


Figura 30.- Sistema de drenaje cuenca Sarandí – Santo Domingo.

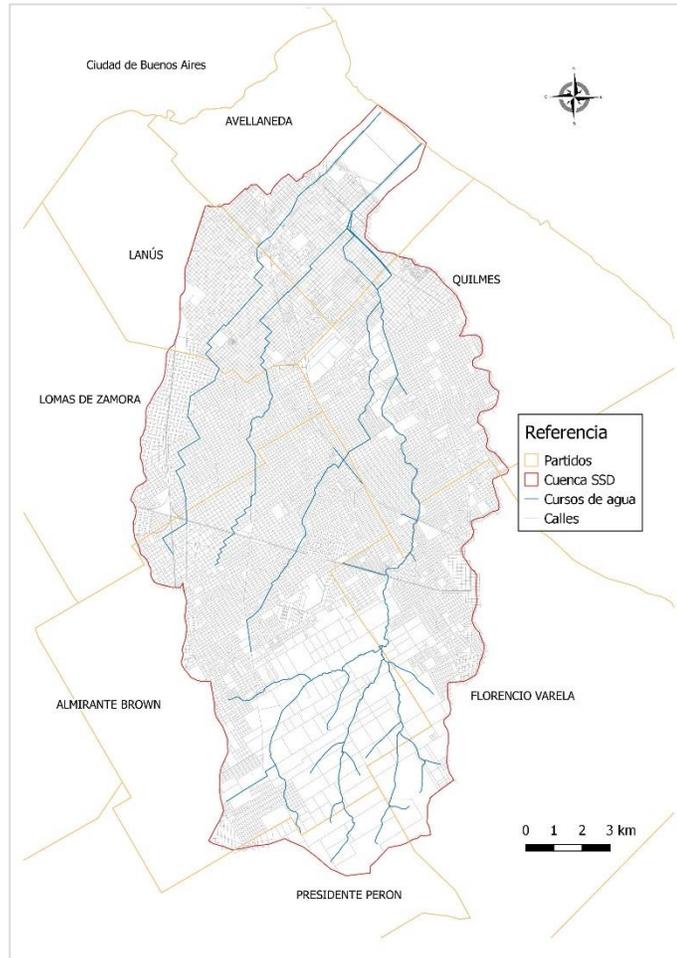


Figura 31.- Red de calles.

Con el objetivo de representar el funcionamiento del sistema de drenaje menor se gestionó la solicitud de desagües pluviales a las entidades municipales correspondientes que se encuentran ubicadas en la cuenca Sarandí – Santo Domingo. Los mismos fueron proporcionados en diversos formatos y llevados a formato vectorial con el fin de ser incorporados al modelo (Figura 32).

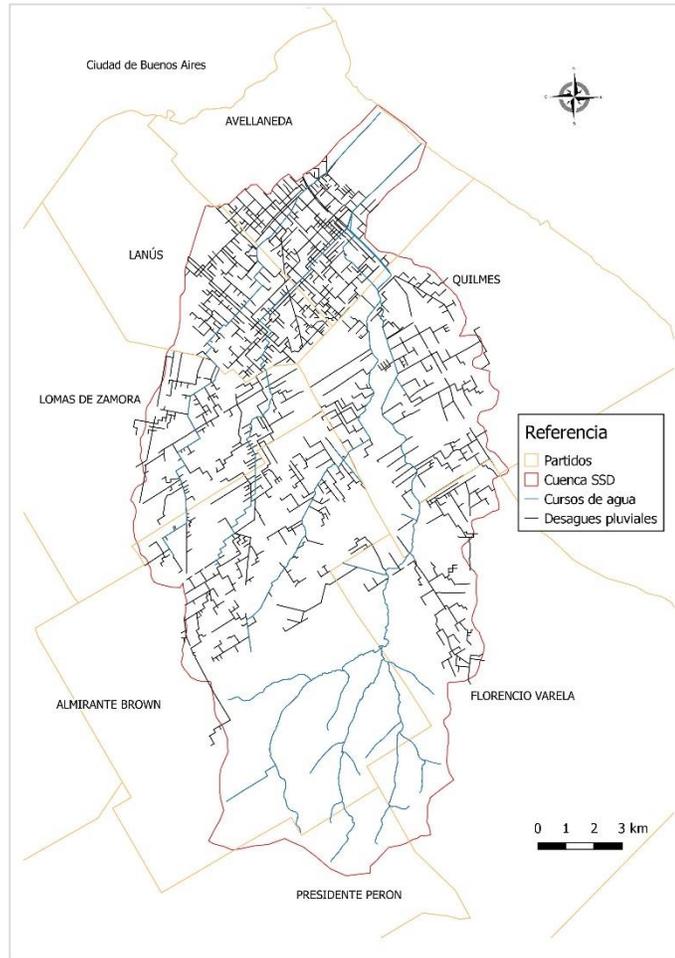


Figura 32.- Red de desagües pluviales

3.3.3.- Calibración

Para una adecuada calibración del modelo hidrológico – hidráulico se instrumentó la cuenca Sarandí – Santo Domingo a través de la instalación de un sensor de nivel en la Estación de Bombeo N° 4 “Barrio La Sarita” sobre el arroyo Las Piedras y en la Estación de Bombeo N° 10 en el “Barrio IAPI” sobre el arroyo San Francisco, ambos sobre el partido de Quilmes.

El evento que se seleccionó para la calibración del modelo hidrológico – hidráulico fue el ocurrido durante los días 8, 9 y 10 de septiembre de 2017, el cual representó el mayor volumen acumulado registrado al momento de iniciarse el proceso de calibración y que generó inconvenientes en la región (Figuras 33 y 34).

Caracterización del impacto por inundación en una cuenca urbana

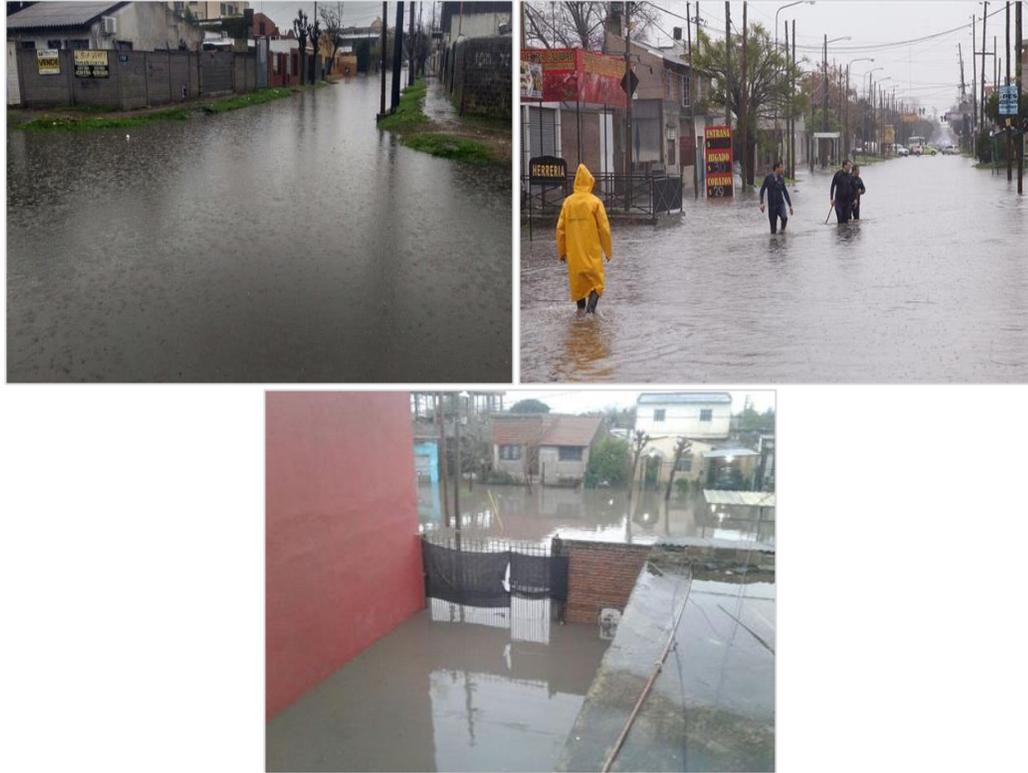


Figura 33.- Inundación producida por el evento pluviométrico del 8, 9 y 10 de septiembre en el partido de Quilmes.

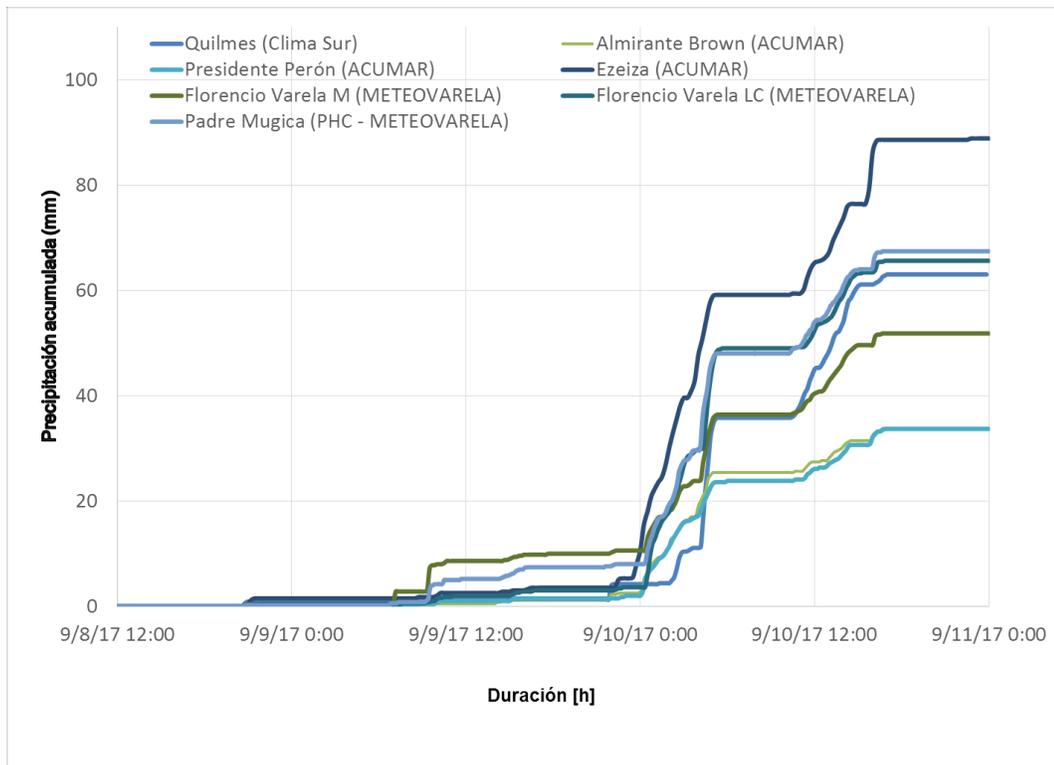


Figura 34.- Pluviómetros utilizados. Evento 8, 9 y 10 de septiembre de 2017.

Para la representación espacial y temporal del evento se trabajó con 9 pluviómetros distribuidos en la región. La serie de datos se unificó temporalmente a intervalos de 10 minutos y se interpolaron espacialmente a través del método inversa de la distancia (IDW) (Figura 35).

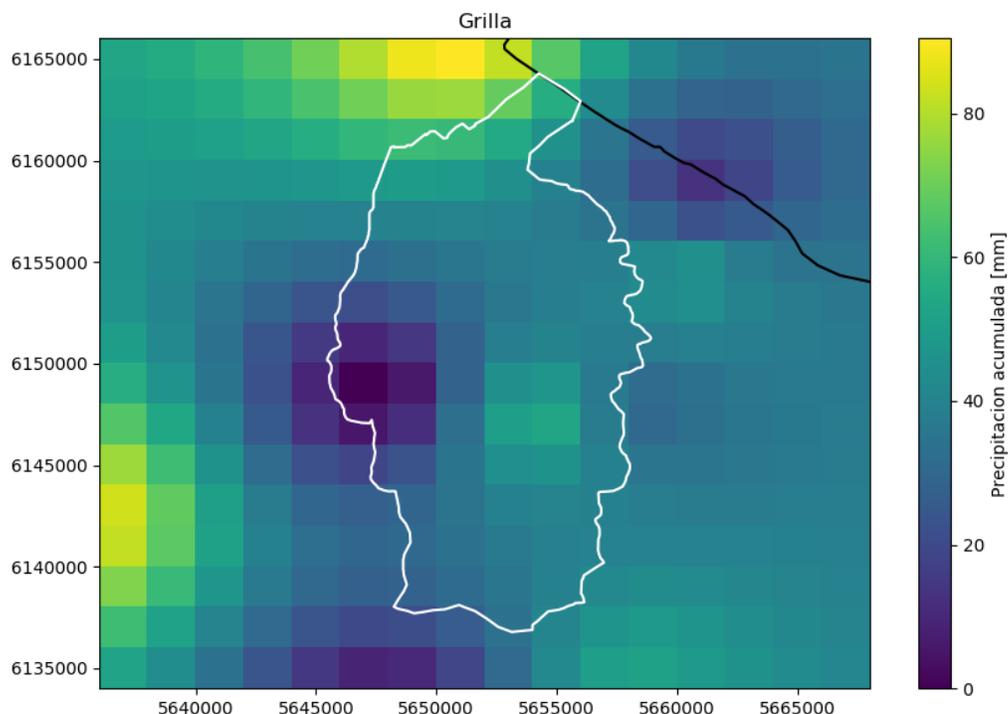


Figura 35.- Interpolación de la precipitación por IDW.

Para la calibración de los limnigramas simulados y observados se ajustaron una serie de parámetros hidrológicos e hidráulicos con diferente grado de certidumbre sobre los valores adoptados. En primera instancia una serie de parámetros se determinaron a través de rangos de valores recomendados en la bibliografía, y por otro lado una serie de parámetros se definieron por calibración, dado que presentan un mayor grado de incertidumbre.

Los parámetros hidrológicos e hidráulicos que se definieron según rangos recomendados por bibliografía fueron: coeficiente de rugosidad n de Manning para conductos y cursos naturales (Tabla 7), coeficiente de rugosidad n de Manning de áreas permeables e impermeables (Tabla 8), almacenamiento en depresión en áreas permeables e impermeables (Tabla 9) y parámetros de infiltración de Horton (Tabla 10).

El valor del coeficiente de rugosidad n de Manning en el caso de cursos naturales se consideró de acuerdo a las características de los cursos de agua presentes en la cuenca, no presentándose sensibilidad entre los diferentes valores recomendados. En el caso de conductos cerrados se consideró a partir del tipo de material de construcción y se seleccionó aquel que presentó mejor grado de ajuste.

Tabla 7.- Rango de coeficiente de rugosidad n de Manning para cursos naturales y conductos cerrados.

Fuente	Tipo	Rango recomendado
Chow (1959)	Cursos naturales limpios, rectos, nivel lleno, sin fallas o pozos profundos con piedras y pastos	0.030 – 0.040
Chow (1959)	Conductos cerrados de hormigón	0.011 – 0.027

Tabla 8.- Rango de valores n de rugosidad de Manning para diferentes coberturas terrestres.

Fuente	Rango recomendado
Crawford y Linsley (1966)	0.01 – 0.40
Engman (1986)	0.01 – 0.48
Yen (2001)	0.01 – 0.18

Los valores de almacenamiento que se seleccionaron fueron los máximos recomendados, dado que el área de estudio presenta baja pendiente y se favorece la acumulación de agua en la cuenca.

Tabla 9.- Rango de valores de almacenamiento en depresión.

Fuente	Valor recomendado áreas permeables (mm)	Valor recomendado áreas impermeables (mm)
Tholin y Keifer (1960)	6.4	1.6
Miller y Viessman (1972)	-	2.5 – 3.8
UDFCD (2007)	10.2	2.5

La ecuación de Horton es estrictamente empírica, para lo cual deberían determinarse los parámetros para cada zona, principalmente, de acuerdo al tipo de suelo y la cobertura vegetal presente. Los valores recomendados en la literatura, para un suelo similar al presente en la región, varían notablemente.

Tabla 10.- Rango de valores modelo de infiltración de Horton.

Fuente	Infiltración inicial f_0 (mm/h)	Infiltración final f_c (mm/h)	Constante de decaimiento k (1/h)
UDFCD (1984)	76.0	12.7	6.5
Porto (1995)	130.0	7.0	2.0
Bastos (2007)	72.5 – 189.0	3.7 – 6.2	17.3 – 17.6
UNLP (2013)	50.0	5.0	2.0

El otro conjunto de datos con los cuales se calibró el modelo fueron: porcentaje de áreas impermeables, porcentaje de transporte entre áreas permeables e impermeables y la dirección del transporte de agua entre zonas permeables a impermeables (Routed).

El porcentaje de áreas impermeabilizadas se estimó en primera instancia a través de la preselección de un conjunto de áreas que presentaban densidades de urbanización similares, sobre las cuales se estimó el porcentaje de áreas impermeabilizadas con el uso de imágenes satelitales de alta resolución espacial. Posteriormente se estimó el porcentaje de área impermeable efectiva, áreas que conectan directamente con el sistema de drenaje dual, a través de la relación entre área impermeable efectiva y total propuesta en Alley y Veenhuis, 1983, considerando escurrimiento superficial desde áreas impermeables a permeables (Figura 36). Estos últimos valores, al ser difíciles de estimar y representar y dada la alta sensibilidad que mostraron fueron importantes en la calibración final. Los valores adoptados para la modelación se observan en la Tabla 11.

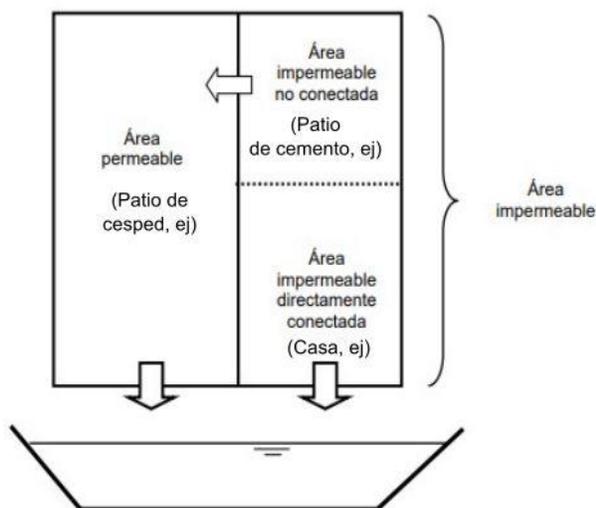


Figura 36.- Escurrimiento en cuencas urbanas.

Tabla 11.- Parámetros utilizados en la modelación hidrológica – hidráulica.

Parámetros	Valores
Coefficiente de rugosidad n de Manning conductos (n)	0.015
Coefficiente de rugosidad n de Manning canales (n)	0.030
Coefficiente de rugosidad n de Manning áreas permeables (n per)	0.100
Coefficiente de rugosidad n de Manning áreas impermeables (n imp)	0.015
Tasa máxima de infiltración (f_o)	100 [mm/h]
Tasa mínima de infiltración (f_c)	10 [mm/h]
Decaimiento (k)	2 [1/seg]
Tiempo de secado	5 [días]
Almacenamiento en depresión áreas permeables (dstore per)	10 [mm]
Almacenamiento en depresión áreas impermeables (dstore imp)	2.5 [mm]
Áreas impermeables sin almacenamiento	50 [%]

(zeroimp)	
Áreas impermeables	5 – 80 [%]
Routed	Permeable
Porcentaje ruteado	Variable según % áreas impermeables [%]

3.3.3.1.- Indicadores de performance

Desde hace ya varias décadas, se comenzó a implementar el concepto de análisis de performance de modelos hidrológicos, como una herramienta auxiliar para el hidrólogo a fin de poder discernir sobre el ajuste a la realidad de dichos modelos. Estos criterios de eficiencia se definen como medidas matemáticas de la bondad de ajuste de la serie simulada a la serie observada (Krause et al., 2005) (Tabla 12).

Tabla 12.- Indicadores de performance utilizados.

Indicador	Formula	Nota
Root Mean Square Error (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_i \text{ sim} - H_i \text{ obs})^2}$	Concordancia global entre la forma de los gráficos de niveles simulados y observados a lo largo del tiempo. Su rango comienza en 0, siendo éste el caso ideal
Nash – Sutcliffe Efficiency (NSE)	$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (H_i \text{ sim} - H_i \text{ obs})^2}{\sum_{i=1}^n (H_i \text{ obs} - \overline{H_i \text{ obs}})^2}$	Relaciona la diferencia entre valores observados y simulados con la varianza de los valores simulados. Rango: 1 (ajuste perfecto) a $-\infty$
Directional Symmetry (DS)	$DS = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N b_i$	Evalúa la concordancia temporal entre la serie observada y la serie simulada. La variable b" que toma el valor de 1 siempre que ambas series coinciden en su valor de derivada y 0 cuando los signos de las derivadas no coinciden
Peak Error (PE)	$PE = H \text{ obs (max)} - H \text{ cal (max)}$	Evalúa la diferencia de la magnitud de los niveles máximos alcanzados.

A partir de los resultados obtenidos se logró una aceptable calibración de los niveles del arroyo Las Piedras en la zona donde se encuentra instalado el sensor de nivel, lográndose reproducir el nivel pico, el tiempo al pico, la forma del limnigrama y la recesión de la curva (Figura 37). Los indicadores RMSE, NSE y DS obtenidos fueron 0.25, 0.90 y 0.79 respectivamente y una diferencia de nivel máximo observado y simulado de 0.06 m.

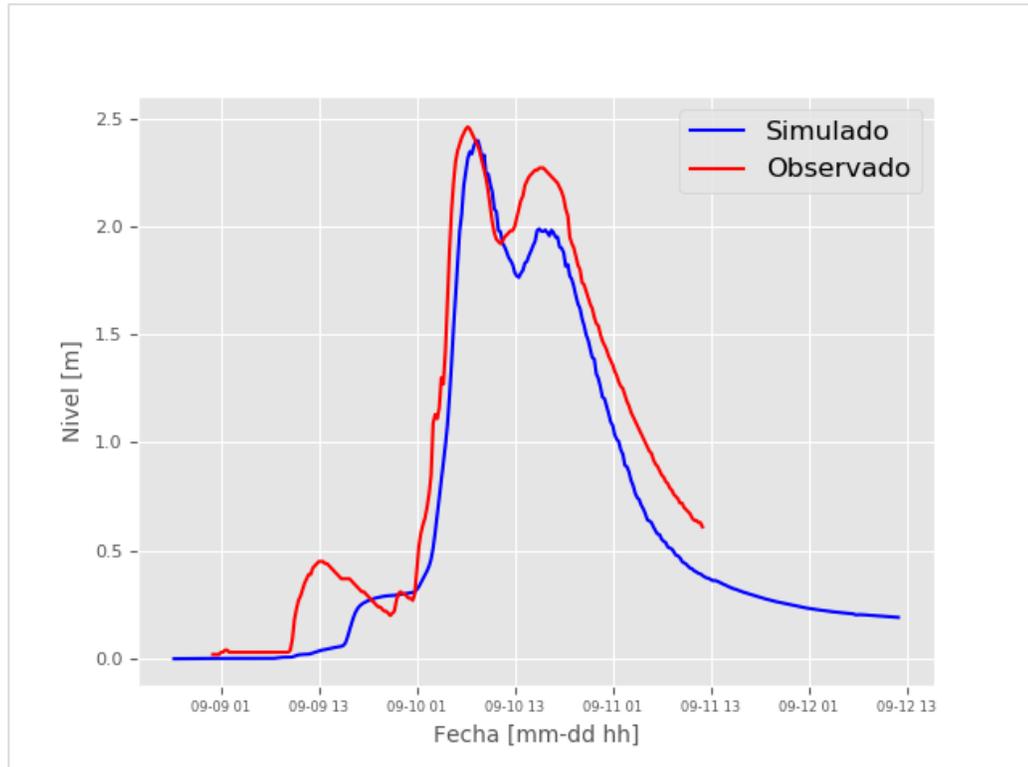


Figura 37.- Resultado de la calibración del modelo. Sensor arroyo Las Piedras. Estación de bombeo n°4 Barrio La Sarita, Quilmes.

3.3.4.- Validación

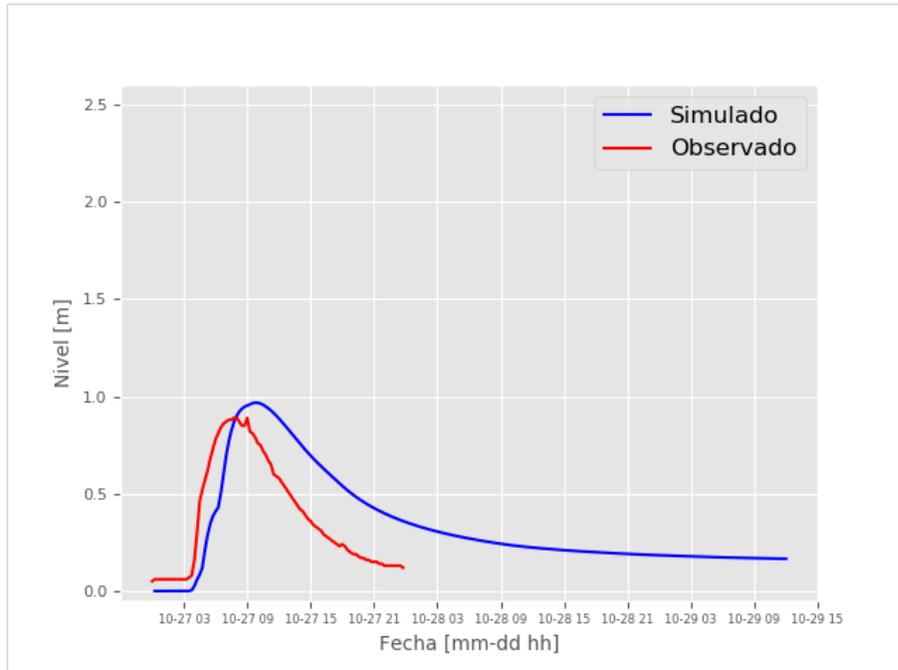
Para el proceso de validación se seleccionaron una serie de eventos de precipitación registrados en la zona, que produjeron una variación del nivel del arroyo Las Piedras en el punto de control mayor a 0.5 m con diferente distribución temporal y espacial de la precipitación, intensidades y volúmenes, durante octubre de 2017 y abril de 2018 (Tabla 13). A su vez se validó el modelo con el nivel observado en el arroyo San Francisco durante el evento del 28 y 29 de abril de 2018 (Figuras 38 y 39).

Tabla 13.- Eventos de precipitación utilizados en el proceso de validación

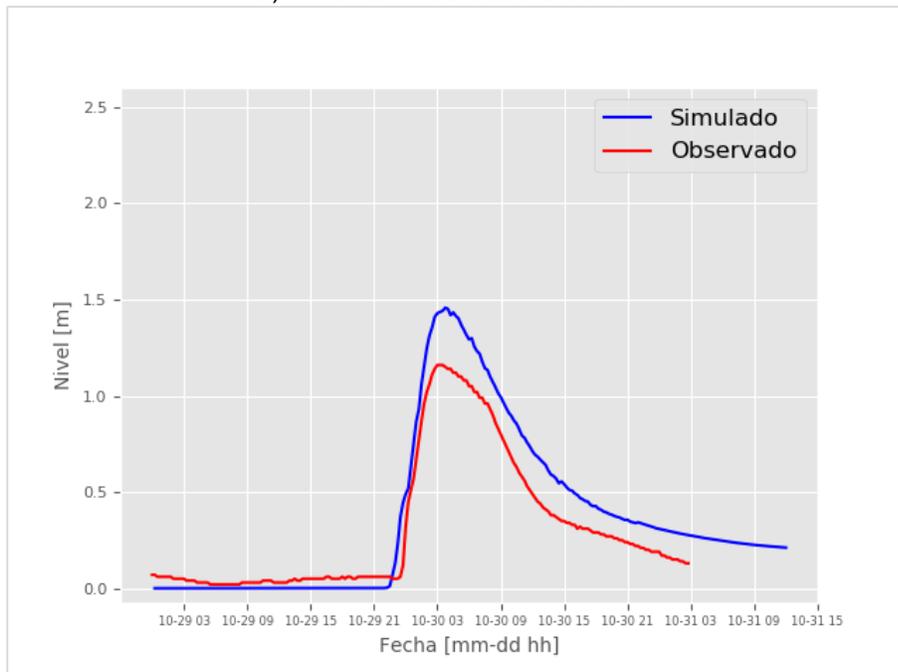
Fecha	Variación de nivel (Δh)
1.- 27 de octubre de 2017	0.85 m
2.- 29 y 30 de octubre de 2017	1.10 m
3.- 02 de noviembre de 2017	0.70 m
4.- 28 y 29 de abril de 2018	2.50 m

Para la verificación de los resultados obtenidos se optó por una evaluación cualitativa comparando los limnigramas observados y simulados y un análisis cuantitativo contemplando los niveles máximos.

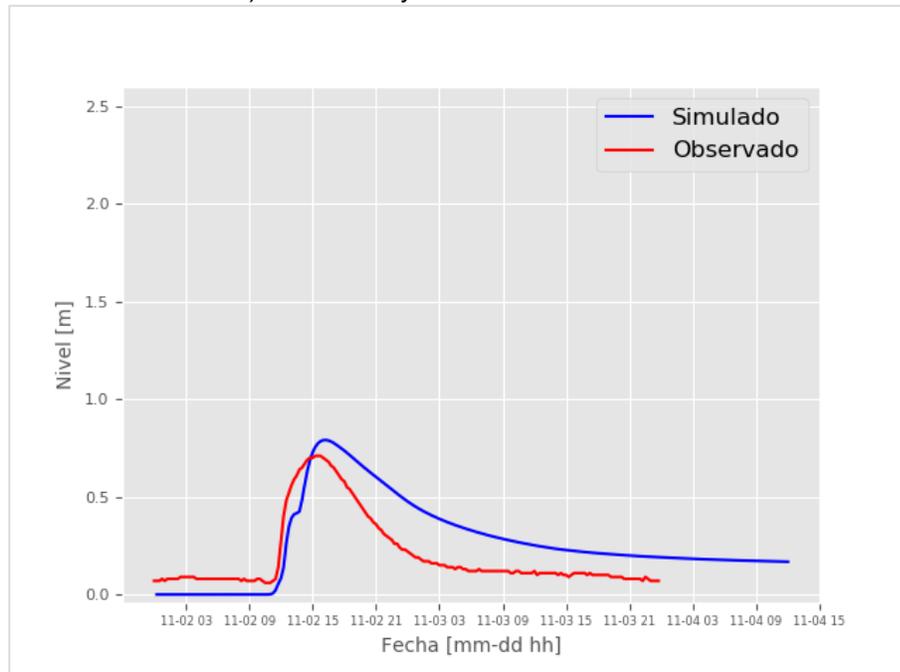
Caracterización del impacto por inundación en una cuenca urbana



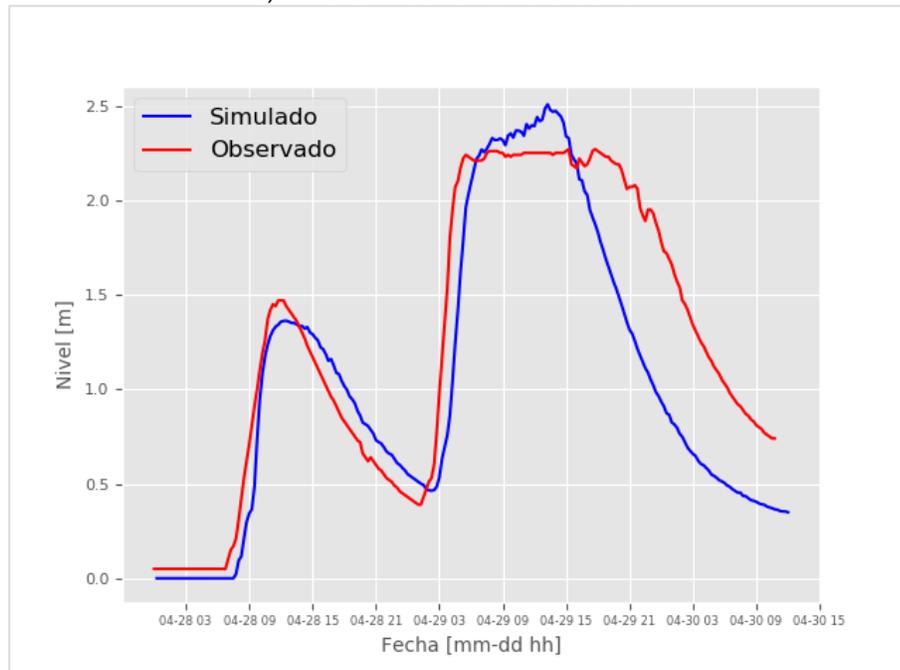
a).- Evento 27 de octubre de 2017



b)- Evento 28 y 29 de octubre de 2017



c)- Evento 2 de noviembre de 2017



d)- Evento 28 y 29 de abril de 2018.

Figura 38.- Series de niveles observados y simulados en el arroyo Las Piedras.

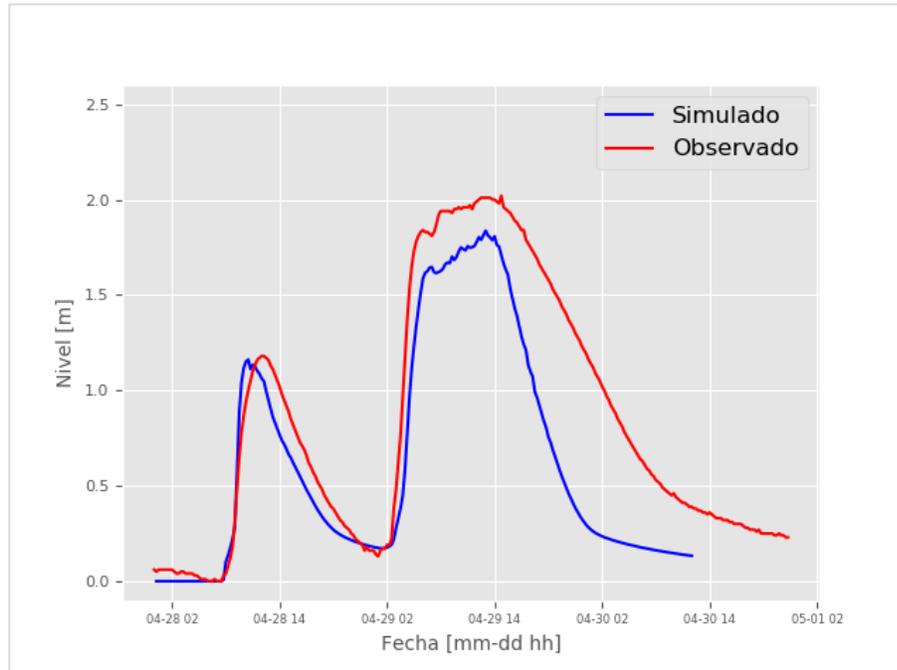


Figura 39.- Serie de nivel observado y simulado en el arroyo San Francisco. Evento 28 y 29 de abril de 2018.

Los indicadores calculados permiten inferir una adecuada validación de la respuesta del modelo hidrológico – hidráulico a eventos de precipitación ocurridos en la cuenca (Tabla 14). A los fines del estudio de inundaciones urbanas es de destacar la reproducción satisfactoria en el evento del 28 y 29 de abril de 2018 en ambos arroyos, el cual generó anegamientos en la zona.

Tabla 14.- Indicadores de performance utilizados.

Modelo	RMSE	NSE	DS	$H_{obs(max)} - H_{cal(max)}$
27 de octubre de 2017	0.29	0.15	0.94	0.08
29 y 30 de octubre de 2017	0.15	0.84	0.95	0.30
02 de noviembre de 2017	0.16	0.30	0.94	0.08
28 y 29 de abril de 2018	0.40	0.74	0.88	0.25

3.4.- Metodología para cuantificar impactos por eventos de inundación

Con el objetivo de cuantificar los impactos producidos por eventos de inundación se trabajó con una serie de resultados obtenidos de la explotación del modelo hidrológico – hidráulico ante el forzante de dos eventos extremos extraordinarios: BSAS1985 y LP2013 y un evento extremo ordinario: SSD2018. Estos resultados se cruzaron con indicadores representativos de las condiciones socioeconómicas de la población presente, estimándose la cantidad de población, hogares, grupos etarios, establecimientos educativos y de salud potencialmente expuestos a diferentes niveles y velocidades de agua. A su vez se utilizó el

indicador niveles de severidad establecido en la metodología SUFRI (Escuder Bueno et al., 2011), y se calculó el tiempo de permanencia del agua en puntos de interés. Por último se analizó el impacto hidrológico producido por el avance de actividades antrópicas sobre sistemas naturales ante la densificación de urbanización en los partidos de Almirante Brown y Florencio Varela y ante el avance de actividades productivas en la zona rural de la cuenca.

En los eventos extremos extraordinarios BSAS1985 y LP2013 la precipitación forzante se consideró como una serie única (dada la escasa o nula presencia de datos puntuales de precipitación), centrada en la cuenca y que presenta decaimiento areal, esto indica cuánto debe reducirse en un punto el hietograma máximo del evento de referencia de acuerdo a su posición relativa al sitio donde se localiza la mayor precipitación.

En el evento extremo ordinario SSD2018 se observó el tiempo en el cual los arroyos se encontraron en su nivel máximo con desborde en áreas locales, siendo este de 8 horas aproximadamente en el arroyo Las Piedras y en el arroyo San Francisco y que afectó principalmente a los partidos de Quilmes, Lanús y Florencio Varela.

Los eventos de inundación simulados presentan características diferenciales en cuanto a magnitud, intensidad y distribución espacial y temporal, por lo cual se resumirán las variables hidrológicas resultantes de la modelación (Tabla 15).

Tabla 15.- Resumen de variables hidrológicas para eventos extremos pluviométricos modelados.

Eventos extremos	BSAS1985	LP2013	SSD2018
Precipitación (mm)	200	255	64
Evaporación (mm)	4	3	4
Infiltración (mm)	87	63	41
Escorrentía (mm)	109	188	19
Caudal pico A° Sarandi (m ³ /s)	80	212	18
Caudal pico A° Santo Domingo (m ³ /s)	201	348	61

Para llevar adelante los análisis planteados se seleccionaron una serie de puntos representativos de lo que ocurre en cada subcuenca, eligiéndose referencias de inundación en aquellos puntos que presentan complicaciones derivadas de eventos de inundación y referencias hidrológicas en el caso de análisis en secciones de control representativas de un cambio en las características hidrológicas de la cuenca (Figura 40 y 41; Tabla 16).

Caracterización del impacto por inundación en una cuenca urbana

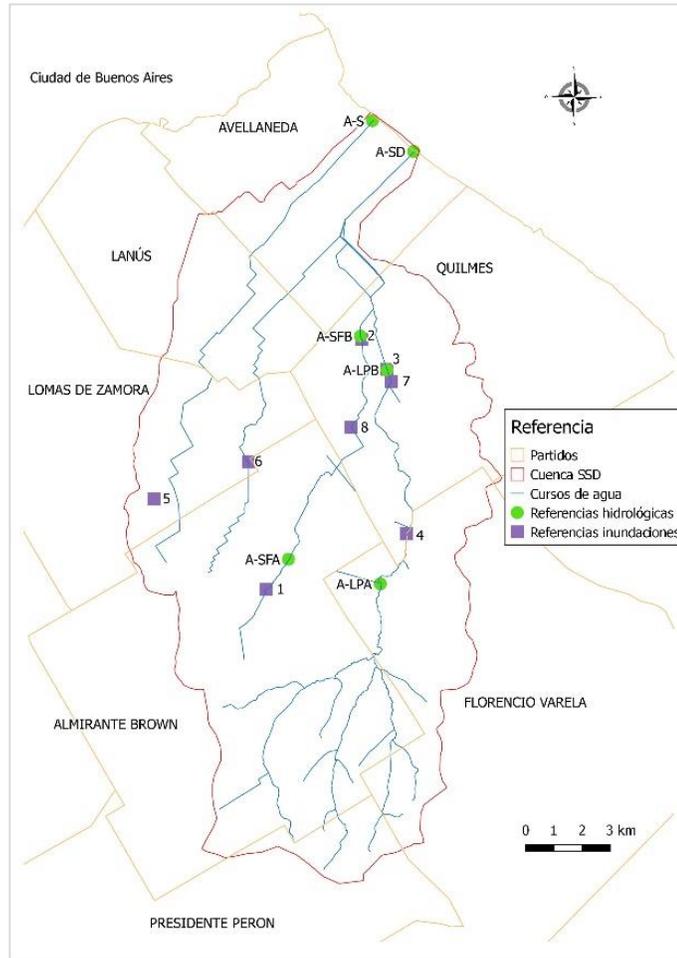


Figura 40.- Puntos de referencias

Tabla 16.- Puntos de referencia utilizados.

Nombre	Ubicación	Tipo	Partido	Subcuenca
1	Calle Alsina y French	Inundación	Almirante Brown	San Francisco
2	Calle Montevideo y A° San Francisco	Inundación	Quilmes	San Francisco
3	Calle República del Líbano y A° Las Piedras	Inundación	Quilmes	Las Piedras
4	Calle 52 A y A° Las Piedras	Inundación	Florencio Varela	Las Piedras
5	Calle 9 de Julio y Brandsen	Inundación	Lomas de Zamora	Galíndez
6	Calle Quilmes y República Argentina	Inundación	Lomas de Zamora	Las Perdices
7	Calle 395 y López	Inundación	Quilmes	Las Piedras
8	Calle 892 y A° San Francisco	Inundación	Quilmes	Las Piedras
A - S	Desembocadura A° Sarandí	Hidrológica	Avellaneda	Sarandí
A - SD	Desembocadura A° Santo	Hidrológica	Avellaneda	Santo Domingo

Caracterización del impacto por inundación en una cuenca urbana

	Domingo			
A – LPB	Cuenca baja del A° Las Piedras	Hidrológica	Quilmes	Las Piedras
A – LPA	Cuenca alta del A° Las Piedras	Hidrológica	Florencio Varela	Las Piedras
A – SFB	Cuenca baja del A° San Francisco	Hidrológica	Quilmes	San Francisco
A - SFA	Cuenca alta del A° San Francisco	Hidrológica	Almirante Brown	San Francisco

Los puntos de referencias de inundación incluyen el punto de referencia 1, el cual se seleccionó por la ocurrencia de inundaciones con desborde del arroyo San Francisco en Claypole, las cuales suelen afectar a dos centros comunitarios importantes de la zona y la calle Alsina que presenta importante circulación (Figura 41a). El punto de referencia 2 se seleccionó por la presencia de inundaciones recurrentes en el barrio IAPI zona con asentamientos informales y un sensor de nivel instalado sobre el arroyo San Francisco (Figura 41b). El punto de referencia 3 se seleccionó por presencia de inundaciones recurrentes en el barrio La Sarita de Quilmes, zona con asentamientos informales y un sensor de nivel instalado en el arroyo Las Piedras (Figura 41c). El punto de referencia 4 se seleccionó por ser un área crítica en el barrio El Molino de Florencio Varela sobre el arroyo Las Piedras, zona con asentamientos informales sobre el cual se extiende un puente peatonal y en el cual hubo víctimas fatales (Figura 41d). El punto de referencia 5 se seleccionó por recurrentes inundaciones en la localidad de Temperley sobre una zona residencial en la cuenca del arroyo Galíndez (Figura 41e). El punto de referencia 6 corresponde al barrio San José de Temperley, zona residencial ubicada en la cuenca del arroyo Las Perdices y que presenta problemas vinculadas a inundaciones urbanas (Figura 41f). Los puntos de referencia 7 y 8 se ubican en la intersección de la calle Montevideo y los arroyos Las Piedras y San Francisco respectivamente y se seleccionaron por tratarse de una calle importante en la conexión de barrios de la zona y como vía de comunicación vial (Figura 41g y 41h).



a)



b)

Caracterización del impacto por inundación en una cuenca urbana



c)

d)



e)

f)



g)

h)

Figura 41.- Imágenes de puntos de referencia utilizados.

Los puntos de referencias hidrológicos se seleccionaron en función de los análisis establecidos de cambios en las condiciones hidrológicas de la cuenca, siendo importante en estos casos el análisis de caudales y niveles en la cuenca alta, media y baja de los arroyos San Francisco y Las Piedras.

3.4.1.- Amenaza por inundaciones urbanas

Para la evaluación de la amenaza por inundaciones urbanas se seleccionaron como indicadores: profundidad máxima por calle, velocidad máxima por calle y tiempo de permanencia por sobre determinados niveles umbrales en áreas que actualmente presentan problemas por inundaciones urbanas. Los indicadores se seleccionaron en función de la condición de estabilidad de personas vinculadas al deslizamiento y vuelco (factores asociados

al ahogamiento de personas), tiempo de permanencia de agua principalmente ante la presencia de personas vulnerables como niños y adultos, anegamientos en caminos viales de importancia y en función de daños materiales por ingreso de agua a viviendas y establecimientos sociales (centros de salud y educativos).

Se analizaron las ubicaciones previamente definidas, que se conoce presentan problemas de inundaciones urbanas recurrentes para determinar el tiempo que se encuentran cubiertas con agua, parámetro clave a la hora de analizar el riesgo de inundación. Se estableció un nivel de agua en calle de 0.30 m a partir del cual se considera que se produce ingreso de agua en las viviendas y establecimientos.

Se abordarán en particular los niveles de severidad establecidos en la metodología SUFRI, la cual establece diferentes criterios de seguridad a partir de parámetros hidráulicos de tirante y velocidad, permitiendo ahondar en los efectos producidos en el vuelco y deslizamiento de personas y fue implementada en diferentes zonas (Forciniti et al., 2011 y Escuder Bueno et al., 2012) (Tabla 17).

Tabla 17- Niveles de severidad según metodología SUFRI.

Nivel de severidad		Tirante Y (m)	Velocidad V (m/s)	Parámetro de vuelco $I=v^*y$ (m ³ /s)	Parámetro de deslizamiento $S=V^2*Y$ (m ³ /s ²)
S0	No se esperan víctimas	<0.45	<1.50	<0.50	<1.23
S1	Severidad Leve. Dificultad para caminar	<0.80	<1.60	<1.00	<1.23
S2	Severidad Media. Pérdidas de estabilidad. Vehículos pierden adherencia	<1.00	<1.88	<1.00	<1.23
S3	Severidad elevada. Alto riesgo para personas en el exterior	>1.00	>1.88	>1.00	>1.23
S4	Severidad extrema. Daños a edificios.	>1.00	>1.88	>3.00	>1.23

3.4.2.- Caracterización de vulnerabilidad

Para la caracterización de la vulnerabilidad ante eventos de inundación se seleccionaron una serie de indicadores representativos de la situación social, económica y física de los habitantes de la cuenca Sarandí – Santo Domingo.

Los indicadores seleccionados fueron: población total, hogares totales, población menor a 5 años, población mayor a 65 años y calidad de vivienda insuficiente. En el caso de viviendas de calidad insuficiente se consideran aquellas que no poseen materiales resistentes, sólidos y con aislación adecuada y no cuentan con cañerías dentro de la vivienda ni de presencia de inodoro con descarga. Estos datos se extrajeron del Censo Nacional de Población, Hogares y Vivienda (INDEC, 2010) y la unidad espacial de trabajo fue a escala de radio censal.

Los indicadores que caracterizan rangos etarios de la población (menores de 5 años y mayores a 65 años) fueron elegidos como representativos de la porción de población que ante la ocurrencia de la inundación presenta mayores problemas de movilidad y de estabilidad. En tanto, el indicador de calidad constructiva de las viviendas resultó tenido en cuenta dado que brinda información acerca de la resistencia y resiliencia de la comunidad (capacidad para hacer frente a la magnitud del evento de acuerdo a la infraestructura física de las viviendas y la capacidad de recuperarse al evento extremo). A su vez es un indicador importante para cuantificar post evento los daños materiales.

El Índice de Vulnerabilidad Social frente a Desastres (González et al., 2016) permite evaluar cualitativamente aquellas áreas, que de acuerdo a características habitacionales (hacinamiento crítico, falta de acceso a red pública de agua potable y falta de acceso a desagües cloacales), sociales (analfabetismo, mortalidad infantil, población de 0 a 14 años y población mayor a 65 años) y económicas (desocupados, nivel educativo de los jefes de hogar y hogares sin cónyuges), son susceptibles de sufrir mayores impactos ante eventos de inundación por ejemplo. Las áreas más vulnerables determinadas en el IVSD es consistente con los indicadores utilizados en este trabajo. Como puede observarse en las Figuras 42, 43 y 44 la cuenca Sarandí presenta niveles de vulnerabilidad social de bajo a medio en la mayor parte de su área. En tanto la cuenca Santo Domingo presenta valores heterogéneos con respecto a niveles de vulnerabilidad, presentando niveles altos en gran parte de las márgenes de los arroyos San Francisco y Las Piedras.

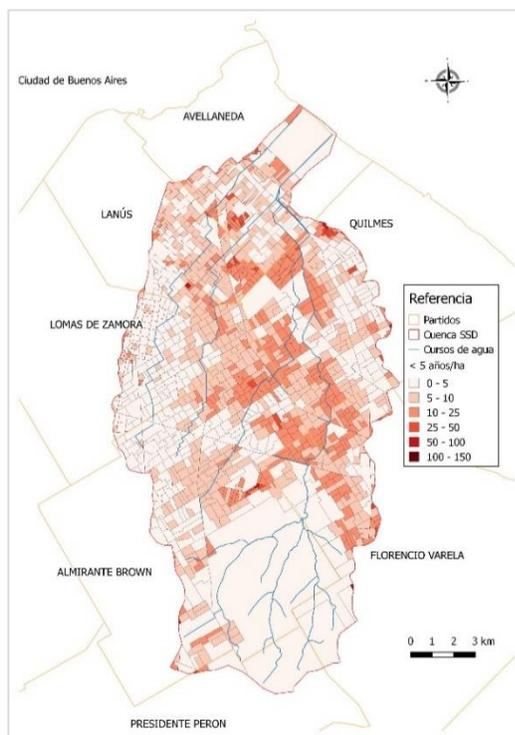


Figura 42.- Población menor a 5 años por hectárea.

Caracterización del impacto por inundación en una cuenca urbana

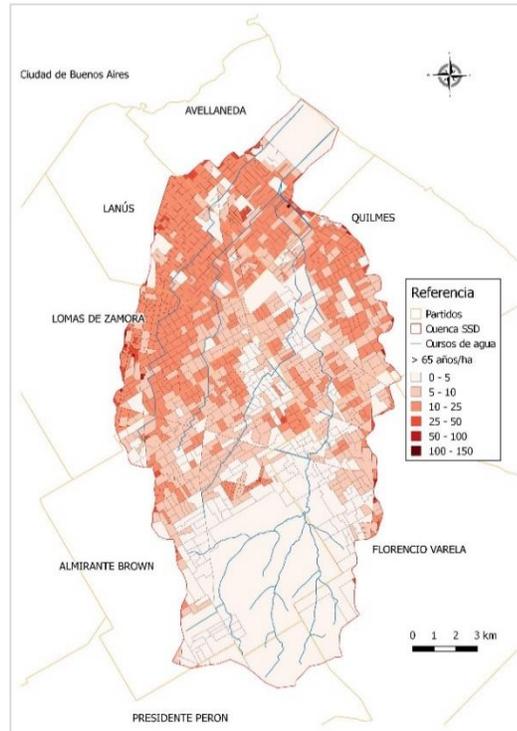


Figura 43.- Población mayor a 65 años por hectárea.

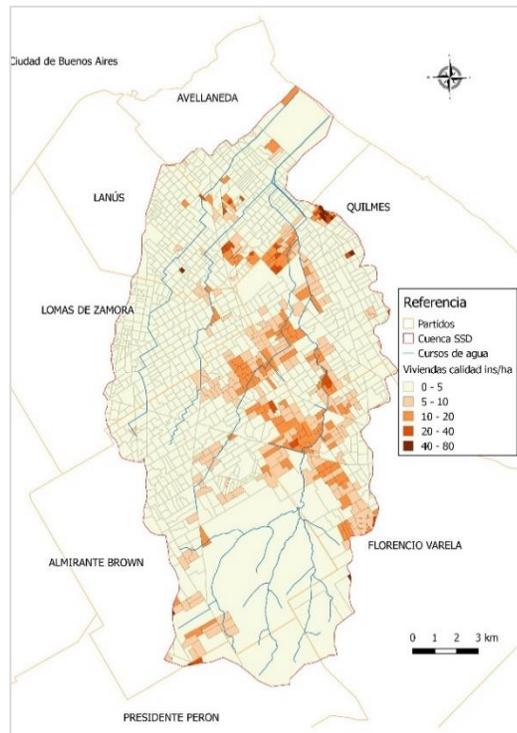


Figura 44.- Viviendas calidad insuficiente por hectárea.

3.4.3.- Impacto social por eventos extremos

Se procedió a realizar un análisis cuantitativo de los impactos producidos por eventos de precipitación extremos extraordinarios: BSAS1985 y LP2013 haciendo uso de los indicadores de amenaza resultantes de la modelación y vulnerabilidad preestablecidos. Para ello se estimó la cantidad de población total que se vería afectada ante la presencia de diferentes niveles de agua máximos alcanzados, los grupos etarios menores a 5 años y mayores a 65 años, viviendas clasificadas como condición insuficiente (INDEC, 2010). Este registro contempla condiciones de exposición ideales, en la cual todas las personas que habitan en la zona se encuentran presentes en sus viviendas, situación que no suele darse en la práctica y permite verificar la cantidad de personas potencialmente afectadas como de bienes inmuebles (Figuras 45, 46 y 47). La exposición potencial a inundaciones es actualmente utilizada como herramienta para informar zonas con presencia de amenaza (National Weather Service, 2019).

A su vez se contabilizó la cantidad de establecimientos educativos y de salud que pueden verse afectados por niveles de agua máximos mayores a 0.3 m, umbral que se estableció como ingreso a los espacios cerrados y mayores a 0.6 m umbral que se consideró relacionado con alturas que alcanzan muebles y objetos materiales (Re et al., 2019, Figura 56). Los establecimientos educativos cuentan con 537 entre los que se incluyen jardines, escuelas primarias y secundarias, especiales, institutos de educación, entre otros. En el caso de establecimientos de salud se contabiliza un total de 108 entre los que se incluyen centros de atención primaria, periféricos, hospitales, entre otros.

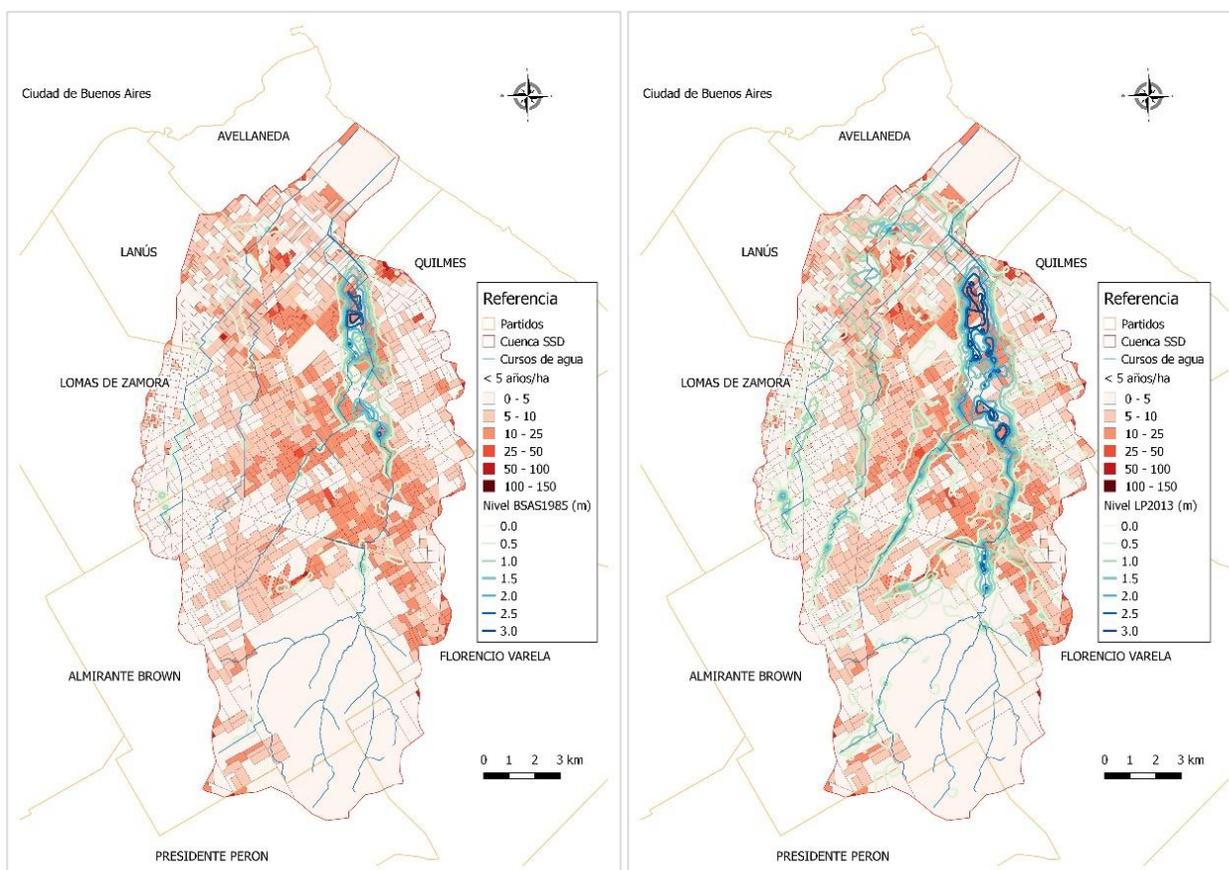


Figura 45.- Población menor a 5 años por hectárea y niveles máximos de agua. Eventos extremos extraordinarios BSAS1985 (izquierda) y LP2013 (derecha).

Caracterización del impacto por inundación en una cuenca urbana

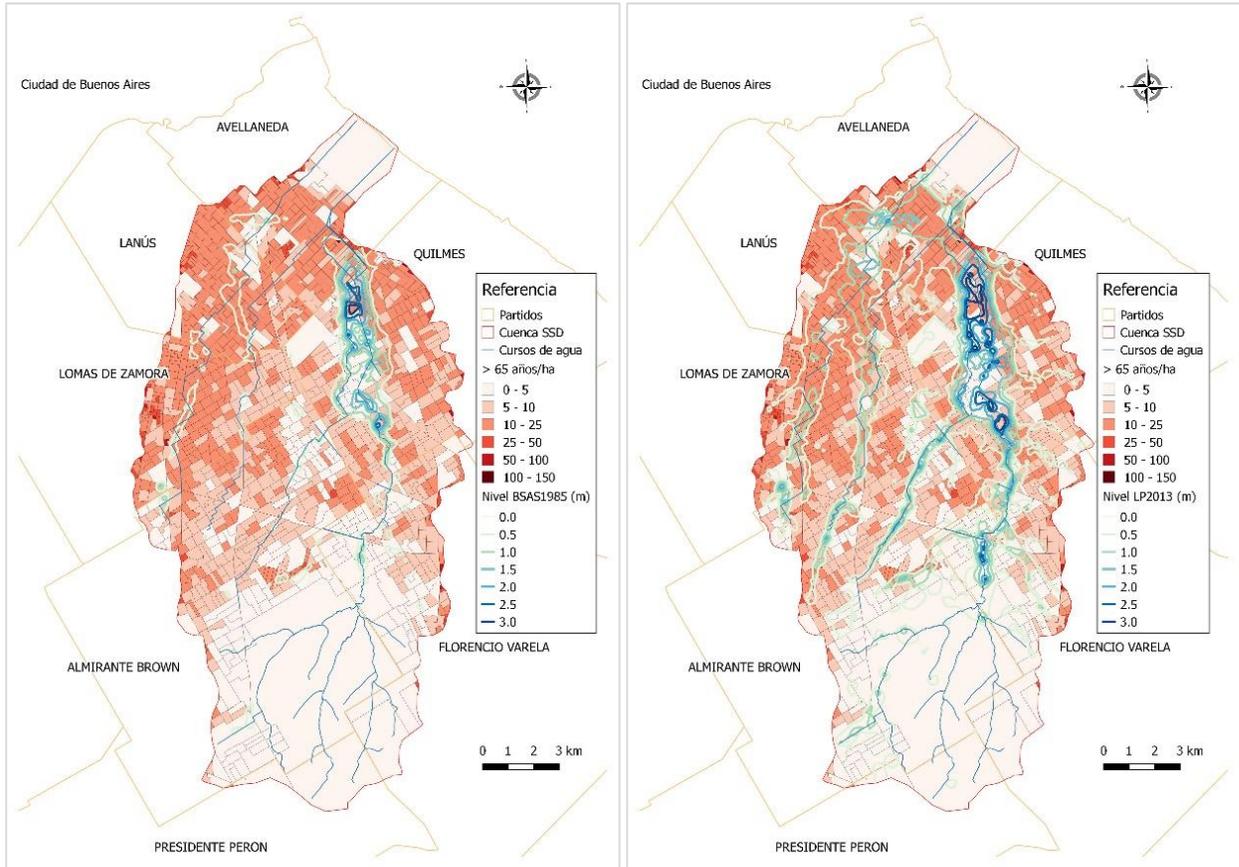


Figura 46.- Población mayor a 65 años por hectárea y niveles máximos de agua. Eventos extremos extraordinarios BSAS1985 (izquierda) y LP2013 (derecha).

Caracterización del impacto por inundación en una cuenca urbana

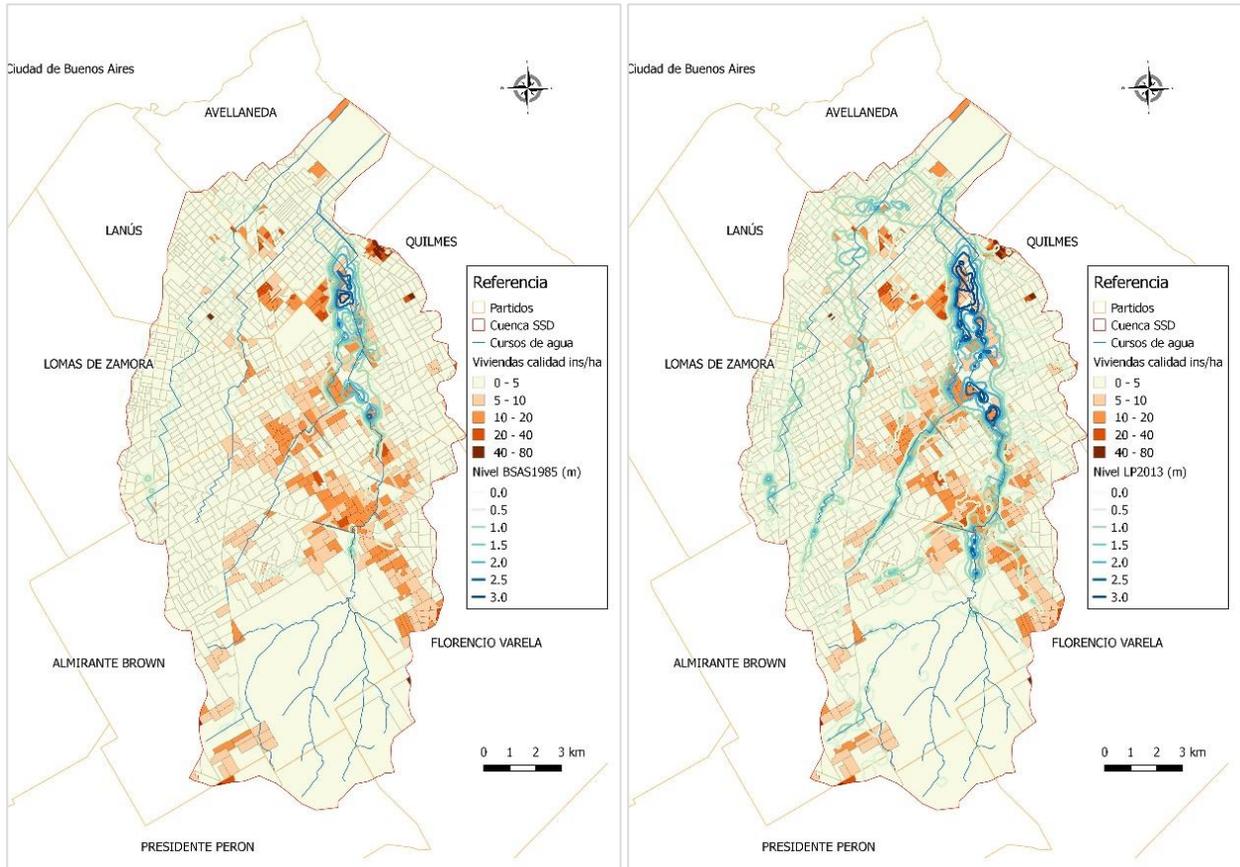


Figura 47.- Viviendas calidad insuficiente por hectárea y niveles máximos de agua. Eventos extremos extraordinarios BSAS1985 (izquierda) y LP2013 (derecha).

En el caso del evento extremos ordinario SSD2018, al tratarse de un evento de menor magnitud, se cuantificó la población, los hogares, los establecimientos de salud y educativos (Figura 48) afectados por niveles mayores a 0.2 m, situación que se consideró problemática para la movilidad en calles y el normal funcionamiento de establecimientos.

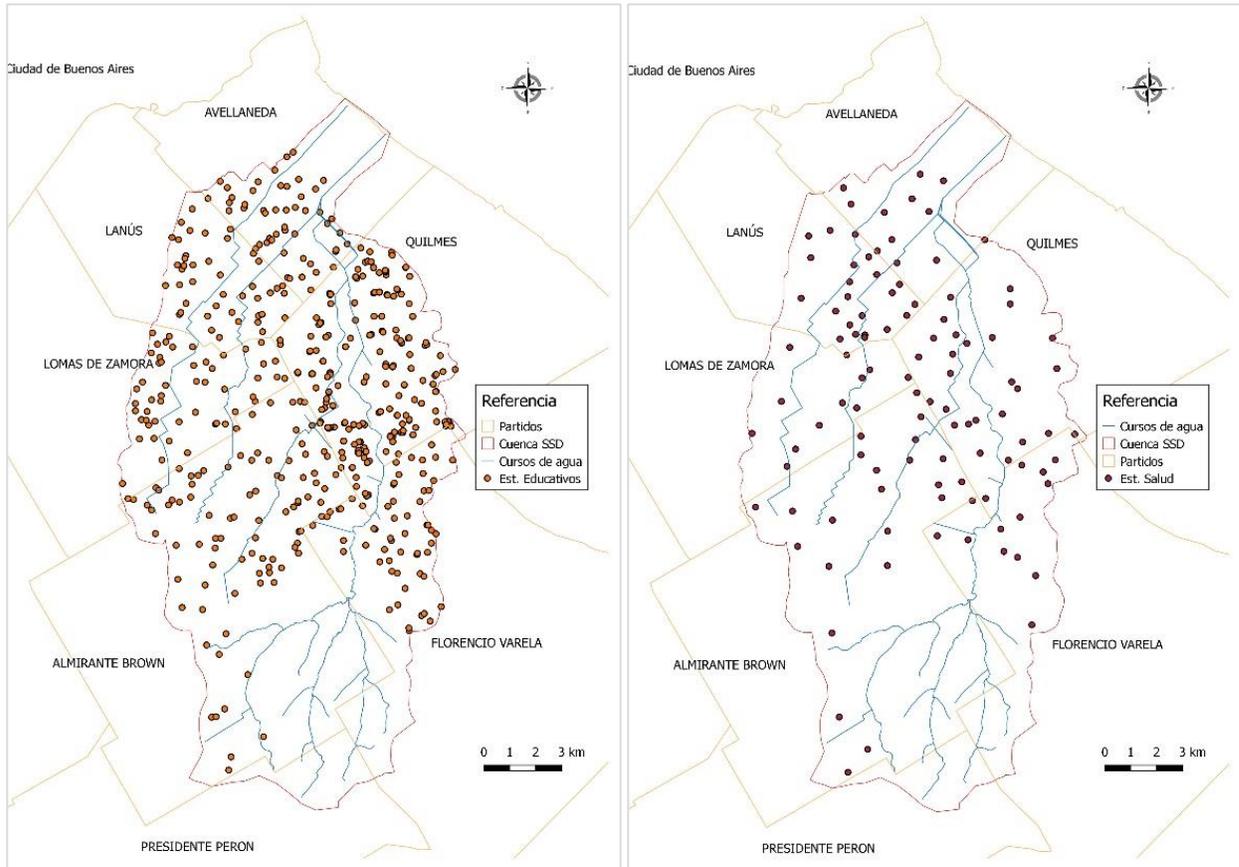


Figura 48.- Establecimientos educativos (izquierda) y de salud (derecha) considerados. Fuente: IGN, 2019.

3.4.4.- Impacto hidrológico por urbanización

Se procedió a evaluar los cambios hidrológicos producidos en eventos extremos de precipitación ordinarios que producen inundaciones urbanas ante cambios en la impermeabilidad de la cuenca Sarandí – Santo Domingo, es decir, ante el avance de la urbanización sobre sistemas naturales.

El primer escenario que se planteó parte de la base del análisis de urbanización que se realizó en el apartado 3.3 de este trabajo, en el cual se observa que los partidos de Almirante Brown y Florencio Varela son los partidos que más han crecido en estos últimos años y a su vez cuentan con mayores extensiones de áreas naturales sobre las cuales se podría intervenir para el desarrollo de acciones. A partir de ello se consideró un aumento en el porcentaje de impermeabilización de un 10 % para ambos partidos, lo que implica un aumento en la densificación de áreas urbanas y no una expansión urbana. En la modelación este cambio se realiza a partir de la modificación del raster de impermeabilidad, aumentando en un 10 % los valores correspondientes a los partidos de Almirante Brown y Florencio Varela.

Para ello se analizó la serie de caudales y niveles alcanzados en la cuenca alta y baja de los arroyos Las Piedras y San Francisco y en el punto de referencia de inundación 4 en el límite entre el partido de Quilmes y Florencio Varela, el balance hidrológico de la cuenca ante diferentes escenarios de impermeabilización y la serie de caudales a la salida de la cuenca de los arroyos Sarandí y Santo Domingo.

El segundo escenario que se planteó es con un 10% de impermeabilidad menos que el escenario actual y un 10% más en toda la cuenca, al igual que en el caso anterior implica una densificación de las áreas urbanas. Para ello se analizó la serie de niveles y caudales alcanzados en la cuenca alta y baja de los arroyos Las Piedras y San Francisco, el balance hidrológico ante diferentes escenarios de impermeabilización y los caudales erogados a la salida de la cuenca de los arroyos Sarandí y Santo Domingo.

3.4.5.- Impacto hidrológico por actividad productiva

En el partido de Ministro Rivadavia (área rural de la cuenca Sarandí – Santo Domingo) se desarrolla una problemática ambiental vinculada a la explotación de ladrilleras, la cual tiene como materia prima la arcilla presente en el suelo. La decapitación, afecta especialmente a los suelos con mayor capacidad de uso (Klingeibel y Montgomery, 1961), los más aptos para la agricultura intensiva y extensiva, e implica la pérdida del capital natural en las áreas de producción destinadas al abastecimiento de alimentos a los centros urbanos más próximos (Hurtado et al., 2008). Ésta decapitación afecta la hidrología local, disminuyendo la capacidad de infiltración del suelo y generando mayores volúmenes de escorrentía directa.

Se contabilizan aproximadamente unas 150 Ha destinadas a la actividad ladrillera (Municipalidad de Almirante Brown et al., 2010). En la Figura 49 se observan áreas destinadas a actividades vinculadas a la explotación de ladrillos y zonas de afectación.

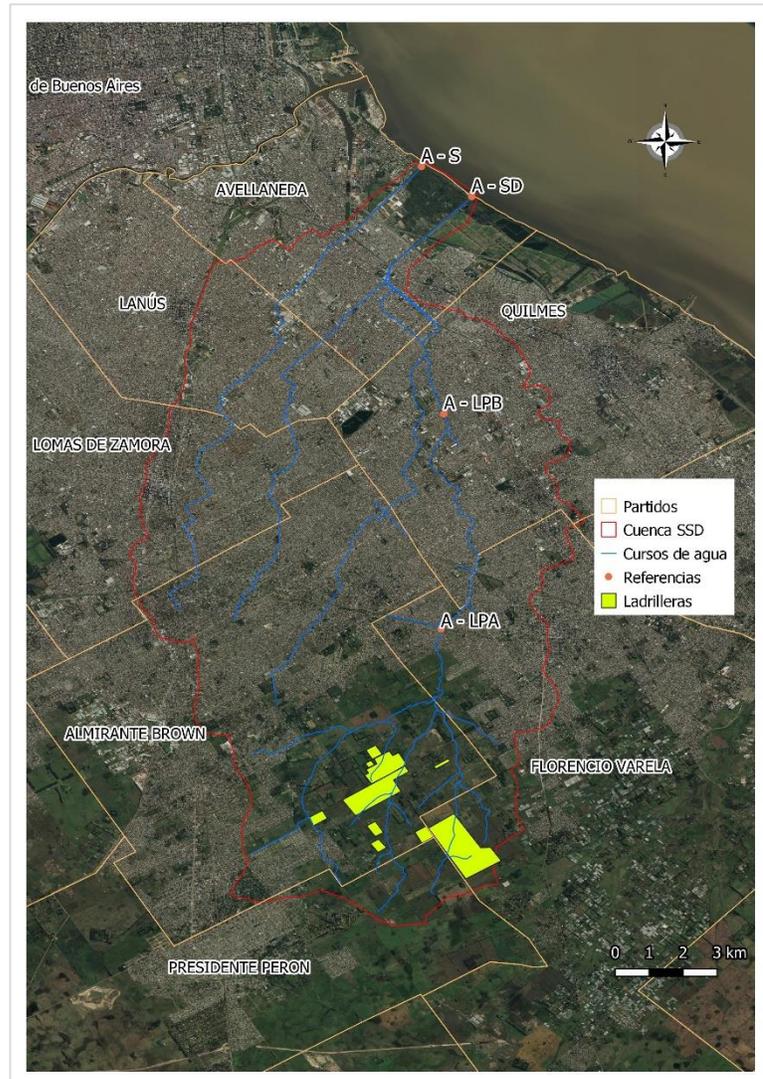


Figura 49.- Predios con presencia de actividad ladrillera

Para cuantificar el impacto producido en la dinámica hídrica de la cuenca se consideró el cambio de uso del suelo rural por 150 hectáreas nuevas destinadas a la explotación ladrillera y se analizó la variación de las series de caudales y nivel de agua producida en la sección donde confluyen los tres ramales del arroyo Las Piedras (A - LPA) y en el sensor de nivel instalado en la EEBB N°4 sobre el arroyo Las Piedras (A - LPB) y las series de caudales en la desembocadura del arroyo Sarandí (A - S) y del arroyo Santo Domingo (A - SD). En la modelación esto se llevó a cabo considerando un cambio en la impermeabilidad de 150 hectáreas entre los ramales del arroyo Las Piedras, variando el grado de impermeabilización de 5 a 80 % en el raster de referencia.

4.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.- Amenaza por inundaciones urbanas

4.1.1.- Niveles máximos en calles

La determinación de niveles máximos alcanzados por eventos extremos de precipitación permite detectar áreas con presencia de anegamientos y potencialmente peligrosas por ingreso de agua a las viviendas o ser una variable en el riesgo por ahogamiento.

En las Figuras 50 y 51 correspondientes a dos eventos extremos extraordinarios ocurridos se puede detectar que la zona comprendida entre la confluencia de los arroyos Las Piedras y San Francisco presenta una alta amenaza por nivel de agua ante eventos de inundación alcanzándose niveles máximos de 3 m para precipitaciones extraordinarias. En el caso de estos eventos extremos extraordinarios se encuentran diferencias en niveles máximos alcanzados asociados a la lluvia acumulada total e intensidad de cada evento. Al respecto el evento extremos extraordinario LP2013 es un evento de mayor intensidad con un máximo de 158 mm/h y 44 mm/h en el caso de BSAS1985.

En la Figura 52, correspondiente al evento de inundación ordinaria se observan diversas áreas con anegamientos leves asociados a la distribución espacial y temporal de la precipitación forzante, la cual ocasionó calles anegadas en diversos puntos y desbordes locales de los arroyos San Francisco y Las Piedras.

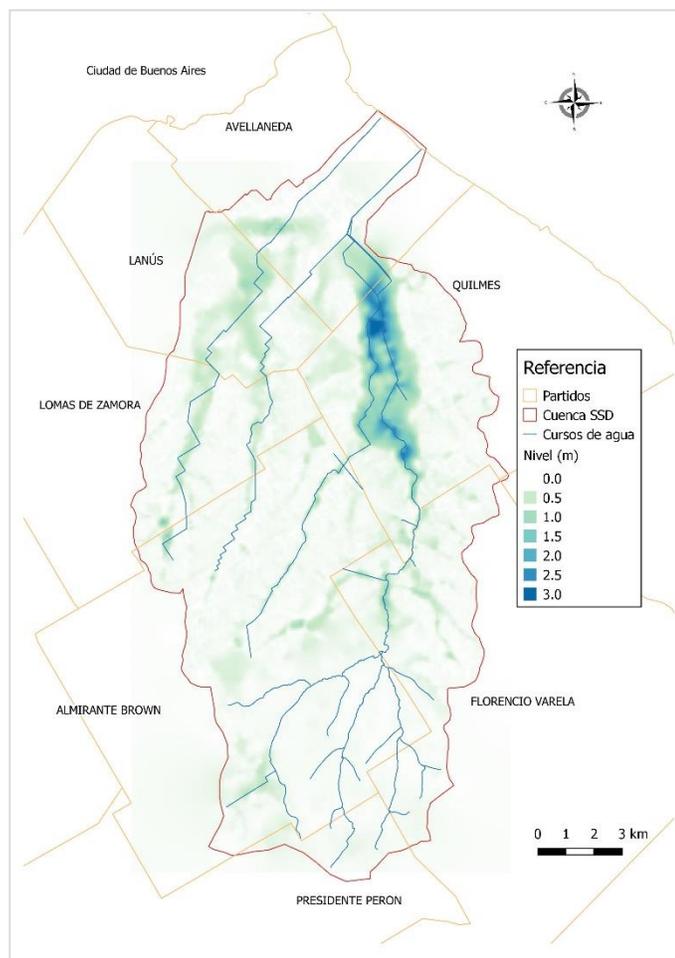


Figura 50.- Niveles máximos alcanzados en calle por el evento extremo extraordinario BSAS1985.

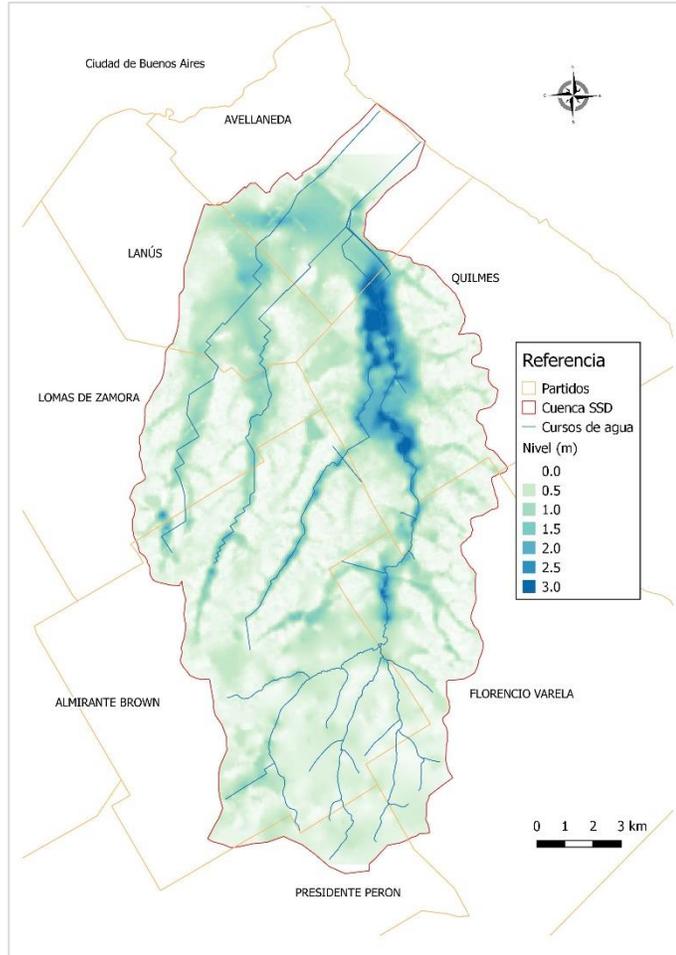


Figura 51.- Niveles máximos alcanzados en calle por el evento extremo extraordinario LP2013.

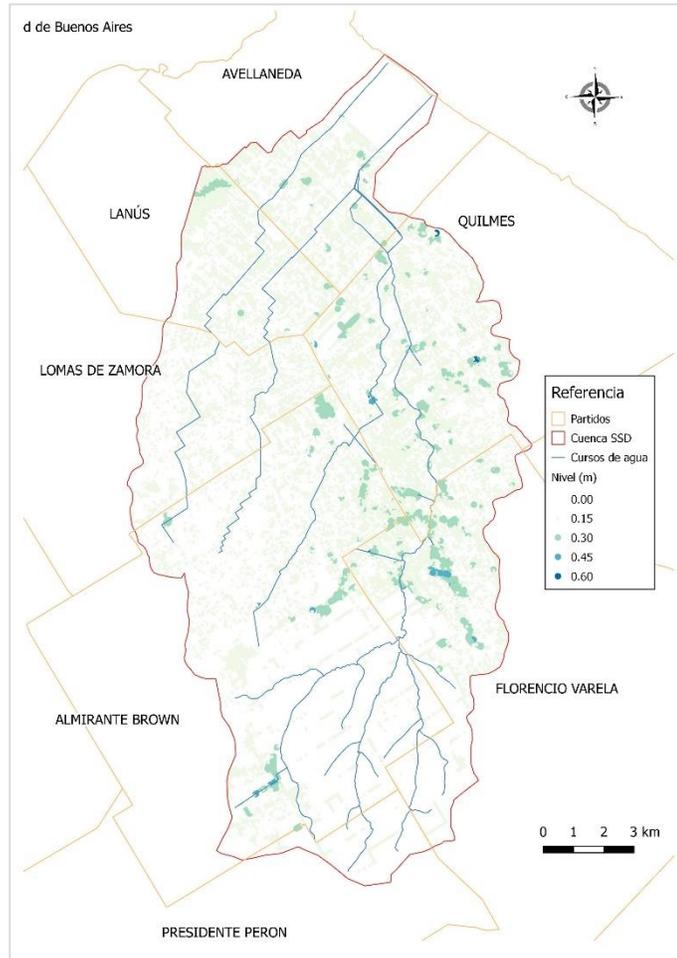


Figura 52.- Niveles máximos alcanzados por el evento extremo ordinario SSD2018.

4.1.2.- Velocidades máximas en calles

Se calcularon las velocidades máximas a fin de estimar áreas peligrosas para el tránsito vehicular y peatonal. En este caso se observa un comportamiento muy diferente para el evento extremo extraordinario BSAS1985 (Figura 53) y LP2013 (Figura 54), obteniéndose en el segundo una serie de velocidades más altas en las calles aledañas a los cursos de agua. Estos valores mayores presumiblemente están asociados a un evento extremo extraordinario de precipitación de mayor intensidad como se mencionó anteriormente. A su vez se verifica que las velocidades máximas no tienen concordancia espacial con los niveles máximos anteriormente descritos. En las Figuras 55 y 56 se observa que las mayores velocidades máximas en calles se dan en inmediaciones de los cursos de agua, principalmente en los arroyos San Francisco y Las Piedras.

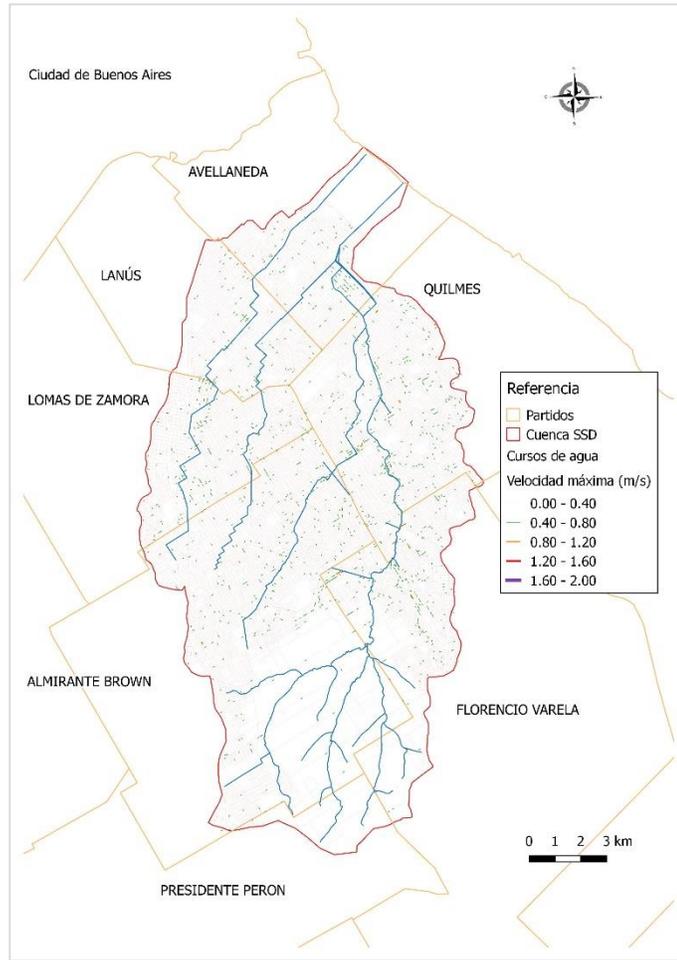


Figura 53.- Velocidades máximas en calles alcanzadas durante el evento extremo extraordinario BSAS1985.

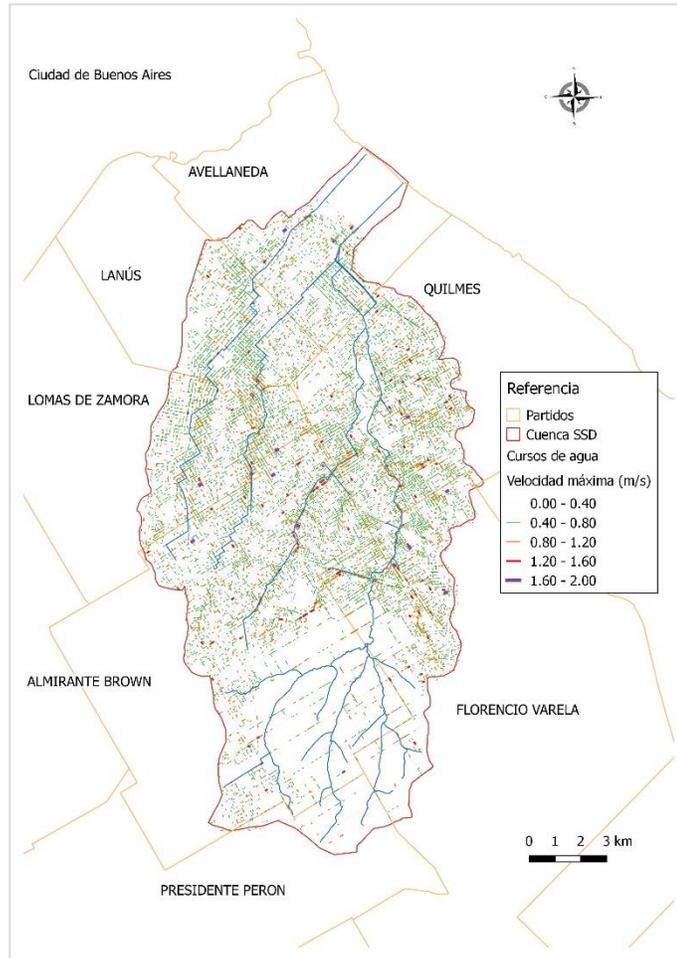


Figura 54.-Velocidades máximas en calles alcanzadas durante el evento extremo extraordinario LP2013.

Caracterización del impacto por inundación en una cuenca urbana

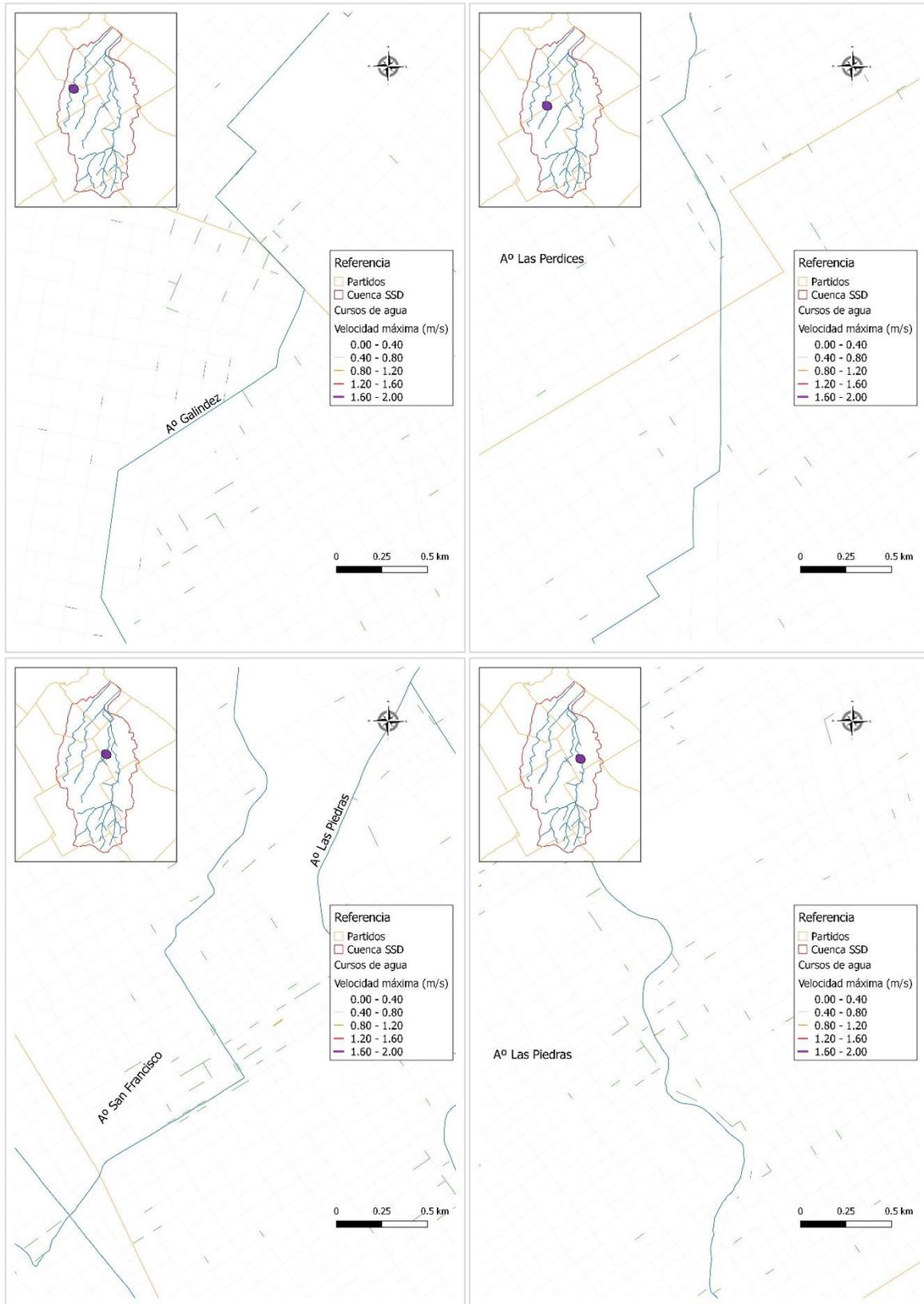


Figura 55.- Velocidades máximas en calles. Evento extremo extraordinario BSAS1985

Caracterización del impacto por inundación en una cuenca urbana

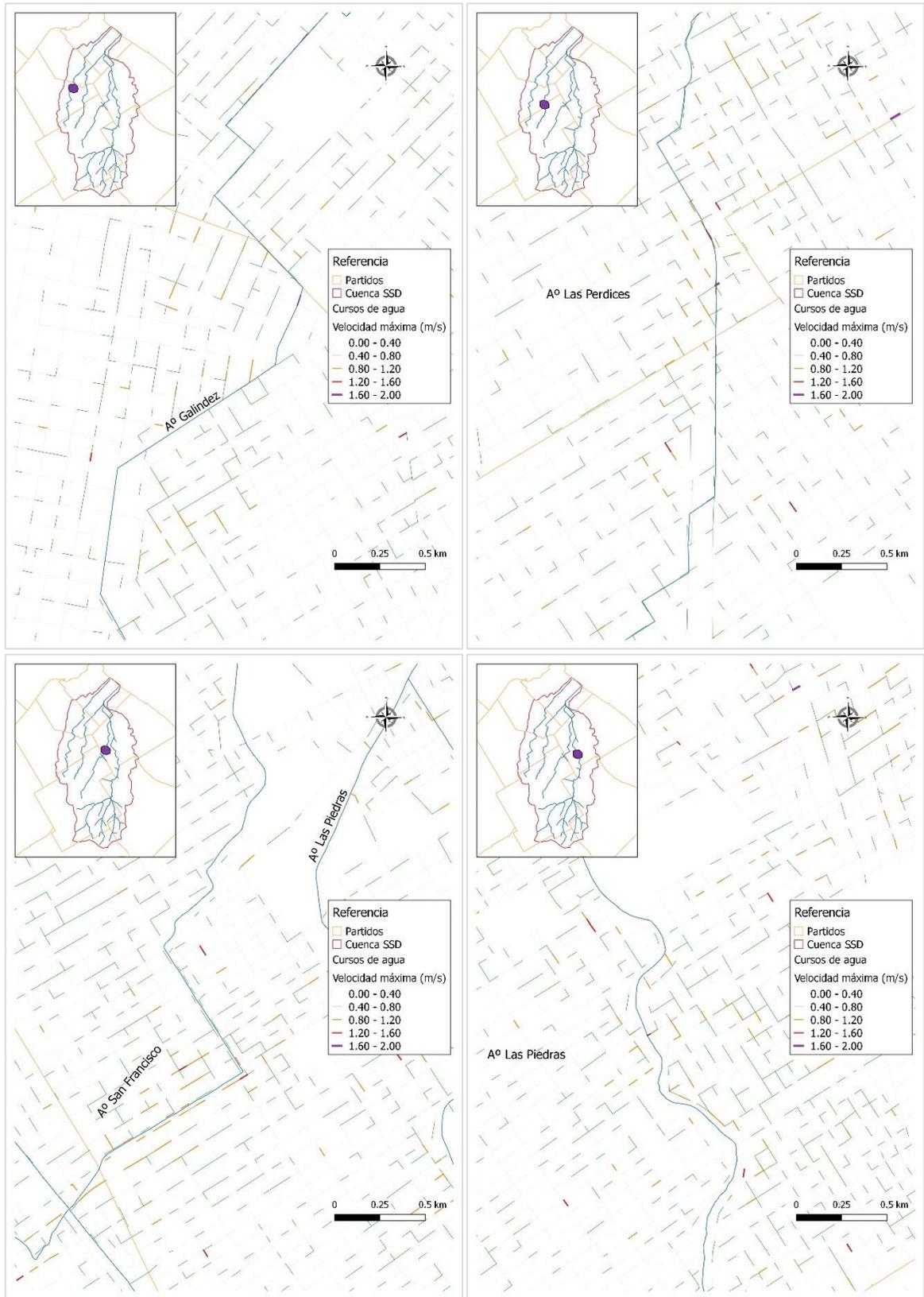
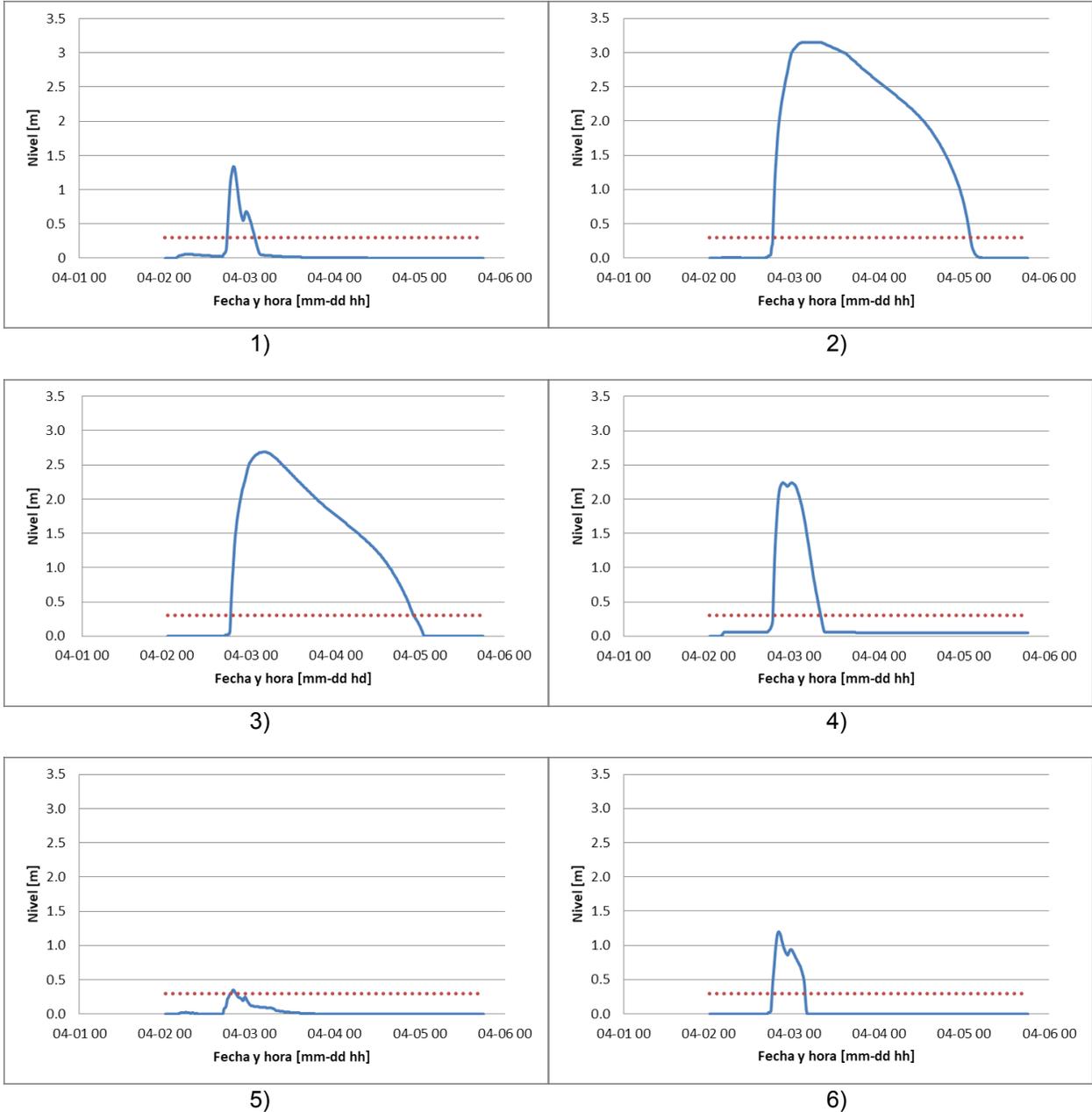


Figura 56.- Velocidades máximas en calles. Evento extremos extraordinario LP2013

4.1.3.- Permanencia del agua

En el evento extremo extraordinario LP2013 se observa que existen cuatro sitios con permanencia de agua por más de 30 horas y niveles superiores a 1.5 m con ingreso de agua en todos los puntos de análisis (Figura 57; Tabla 18).



Caracterización del impacto por inundación en una cuenca urbana

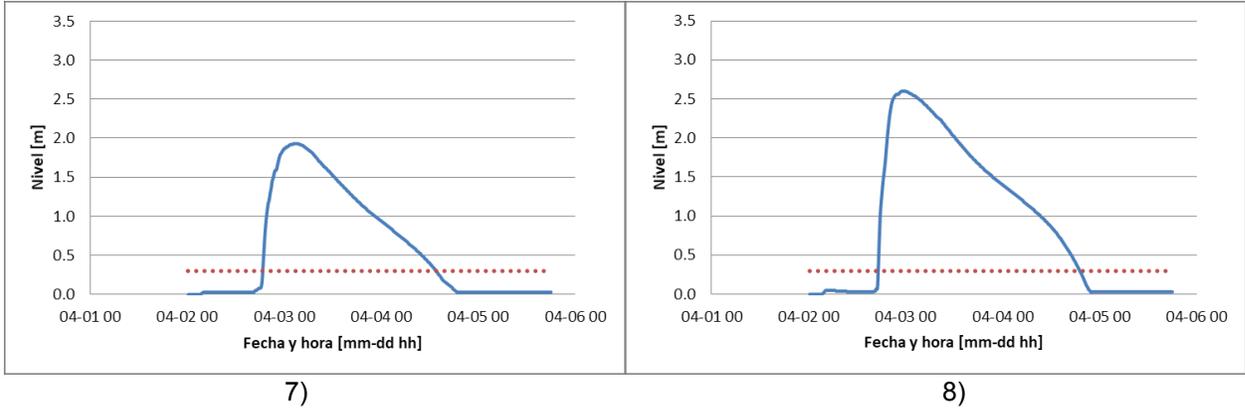
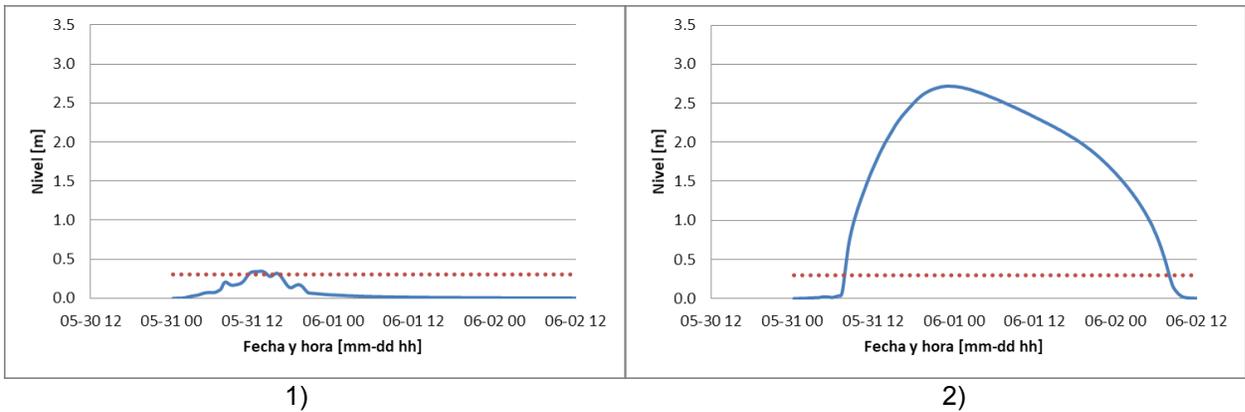


Figura 57.- Nivel de agua en calles en puntos de referencia establecidos. Evento extremos extraordinario LP2013.

Tabla 18.- Tiempo de permanencia de agua. Evento extremo extraordinario LP2013.

Punto de referencia	Permanencia de agua (horas)
1	8
2	55
3	52
4	13
5	1
6	9
7	38
8	50

En el evento extremo extraordinario BSAS1985 los tiempos de permanencia de agua son inferiores a LP2013 pero siguen siendo elevados, se observa que existen cuatro sitios con permanencia de agua por más de 30 horas y niveles superiores a 1 m. En el punto de referencia 1 sobre la subcuenca del arroyo Sarandí no hay ingreso de agua a viviendas y establecimientos (Figura 58; Tabla 19).



Caracterización del impacto por inundación en una cuenca urbana

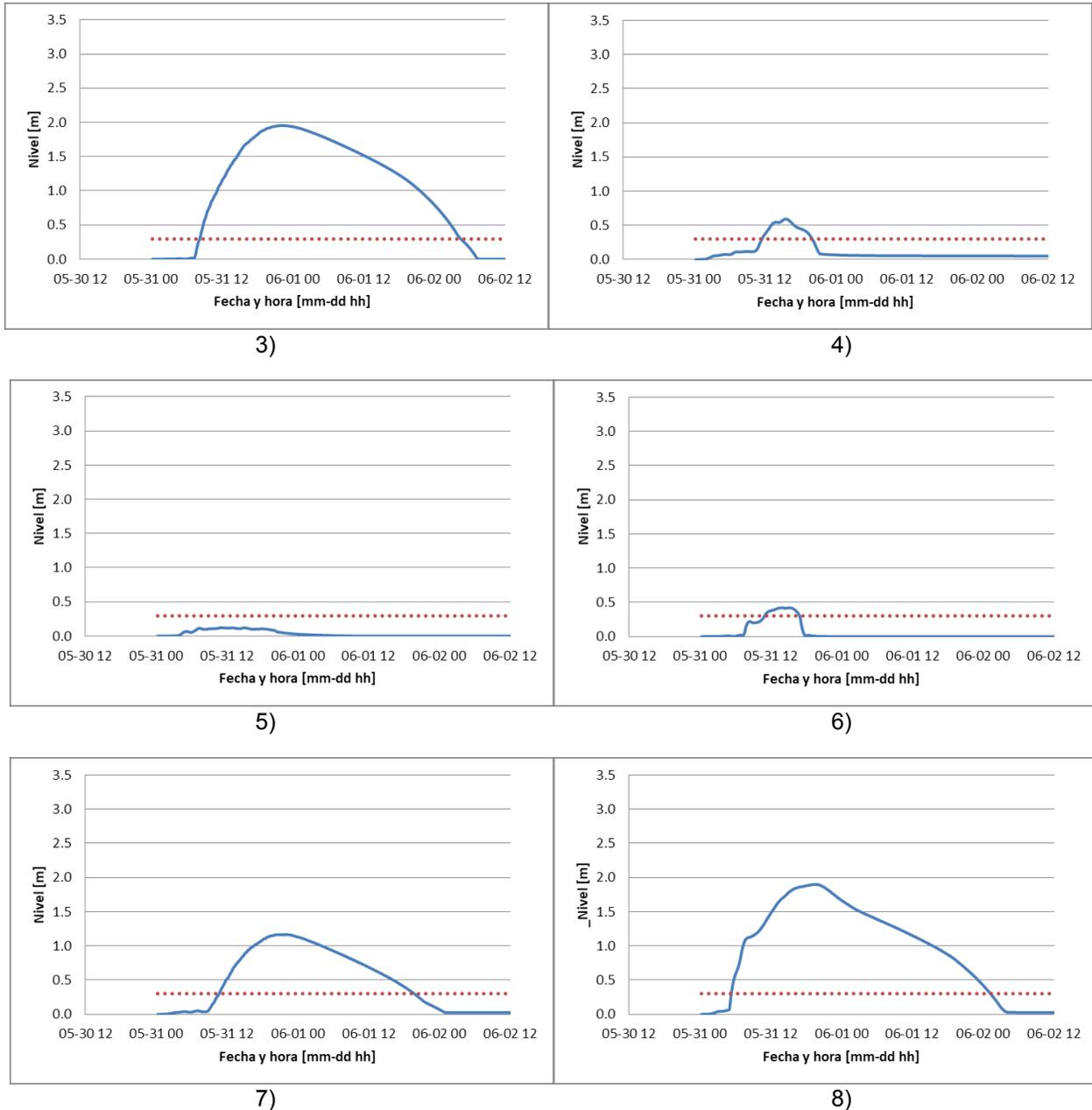


Figura 58.- Nivel de agua en calles en puntos de referencia establecidos. Evento extremo extraordinario BSAS1985.

Tabla 19.- Tiempo de permanencia de agua. Evento extremo extraordinario BSAS1985.

Punto de referencia	Permanencia de agua (horas)
1	3
2	48
3	44
4	8
5	-
6	6

7	33
8	44

4.1.4.- Niveles de severidad

En el caso del evento extremo extraordinario LP2013 se observa que los niveles de severidad calculados para cada punto de referencia indican la presencia de dos sitios con niveles S3 (severidad elevada), dos con niveles S1 (severidad leve) y el resto presenta niveles S0 (no se esperan víctimas). A partir de la vinculación de los resultados de permanencia de agua y niveles de severidad se puede inferir que en los puntos estudiados si bien se presentan altos niveles de agua que pueden poner en riesgo la vida de las personas, no presentan altas velocidades obteniéndose niveles de seguridad bajos en gran parte de los puntos estudiados. A su vez se determina que los niveles de severidad mayores se presentan sobre el arroyo San Francisco, alcanzándose niveles de S3. Estos puntos sobre el arroyo San Francisco presentan niveles de severidad mayores al resto, principalmente por la ocurrencia de velocidades máximas más altas en los puntos analizados sumados a niveles máximos considerables.

En el caso del evento extremo extraordinario BSAS1985 se observa que los niveles de severidad calculados para cada punto de referencia indican la presencia de un sitio con nivel S1 (severidad leve) y el resto presenta niveles S0 (no se esperan víctimas). Al igual que en el caso anterior, permite inferir que si bien se presentan altos niveles de agua que pueden poner en riesgo la vida de las personas, no presentan altas velocidades obteniéndose niveles de seguridad bajos en gran parte de los puntos estudiados (Figura 59).

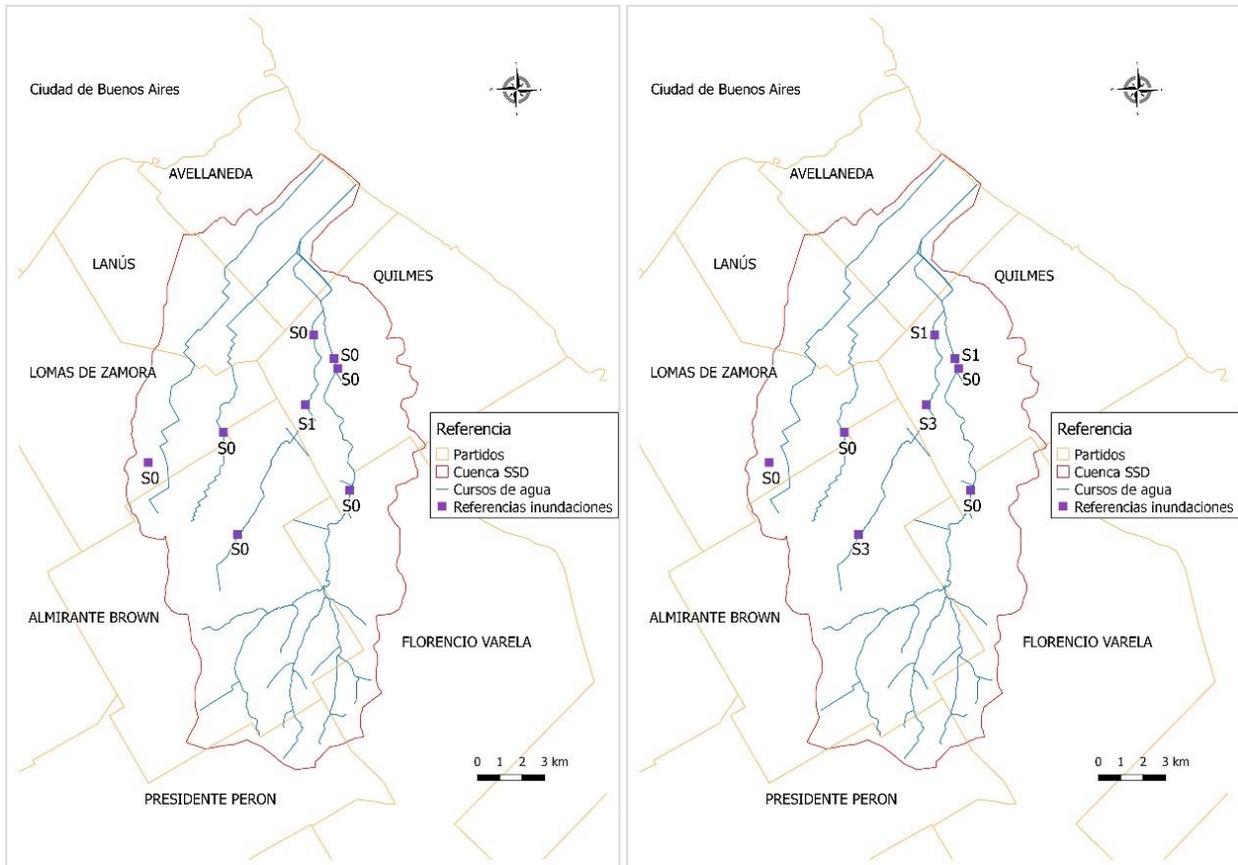
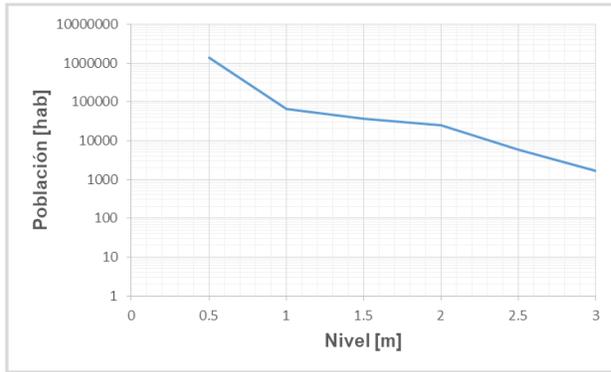


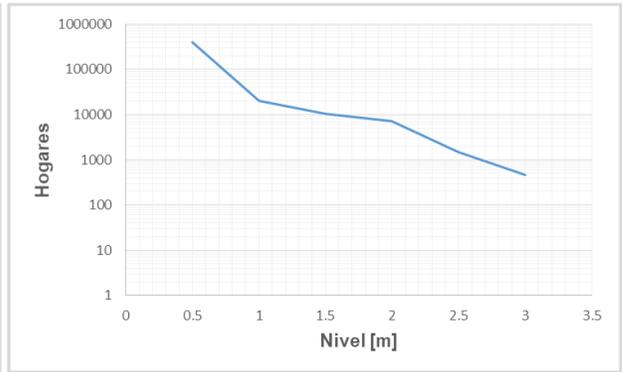
Figura 59.- Nivel de seguridad SUFRI. Eventos extremos extraordinarios BSAS1985 (izquierda) y LP2013 (derecha)

4.2.- Impacto social por eventos extremos

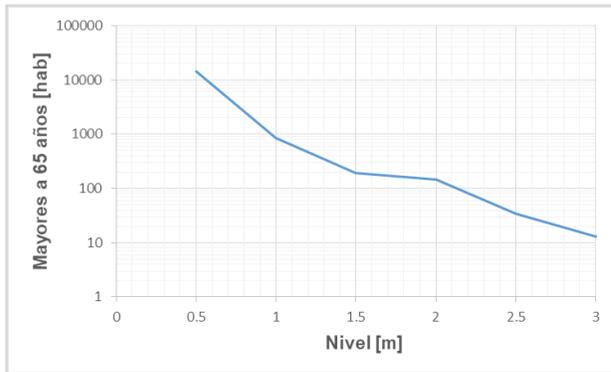
Para un evento extremo extraordinario de precipitación de las características de BSAS 1985 se estimó que cerca de 1500 personas pueden verse afectadas con alturas máximas de agua de 3 m (Figura 60a) y más de 2000 hogares afectados con niveles por encima de los 2 m (Figura 60b). A su vez, se contabilizan unas 1300 personas mayores de 65 años que se verían afectadas con alturas máximas de agua mayores a 0.5 m y 1200 menores de 5 años afectados con alturas máximas de agua mayores a 0.5 m (Figuras 60c y 60d). En el caso de viviendas de calidad constructiva insuficiente se estimó que unas 500 viviendas se verían afectadas por alturas mayores a 2 m (Figura 60e).



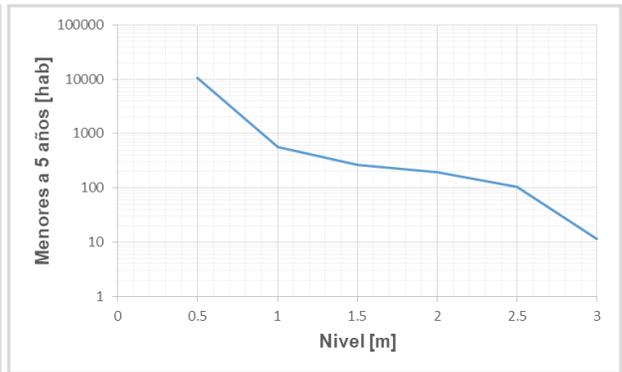
a)



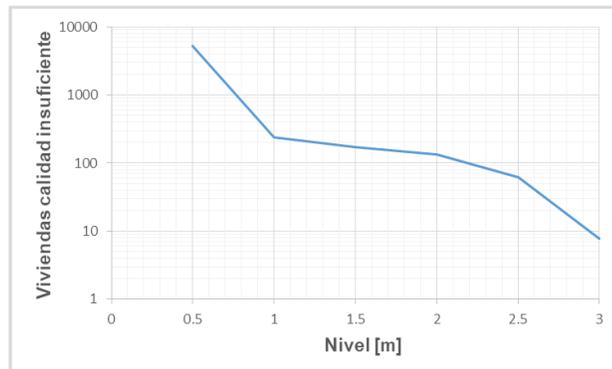
b)



c)



d)



e)

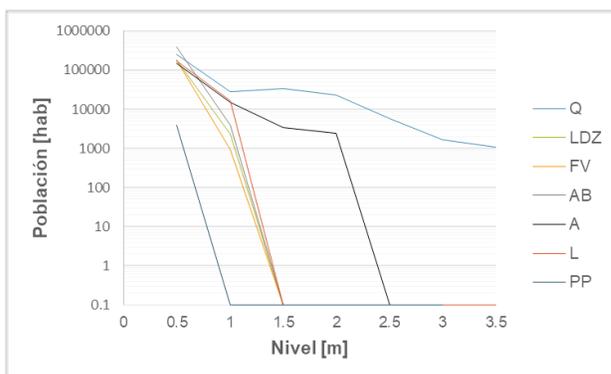
Figura 60.- Cuantificación de impactos. a)- Población expuesta, b)- Hogares expuestos, c)- Mayores a 65 años, d)- Menores a 5 años afectados por diferentes niveles de agua y e)- Viviendas calidad insuficiente

Se realizó una discretización por unidad administrativa, verificándose que para el evento extremo extraordinario de BSAS1985 el total del área inundada con niveles mayores a 2 m se encuentra localizada sobre el partido de Quilmes (Tabla 20).

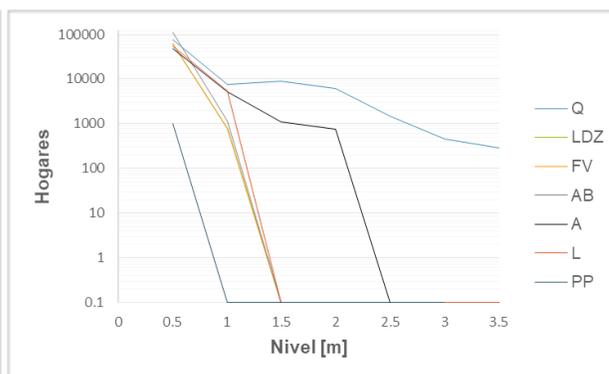
Tabla 20.- Origen de población expuesta. Evento extremo extraordinario BSAS 1985.

BSAS1985	Menos a 1 m	Entre 1 y 2 m	Más de 2 m
Quilmes	21 %	91 %	100 %
Lomas de Zamora	13 %	0 %	0 %
Lanús	13 %	0 %	0 %
Florencio Varela	13 %	0 %	0 %
Almirante Brown	28 %	0 %	0 %
Avellaneda	12 %	9 %	0 %
Presidente Perón	0 %	0 %	0 %

Haciendo uso de los indicadores planteados se cuantificaron los impactos a nivel de partido. Los resultados obtenidos pueden observarse en la Figura 61, destacándose los mayores niveles sobre el partido de Quilmes. Específicamente sobre Quilmes se contabilizaron 93600 (Figura 61a) personas afectadas potencialmente con niveles mayores a 0.5 m entre los que se incluyen 490 (Figura 61b) mayores de 65 años y 809 (Figura 61c) menores a 5 años, y 25299 (Figura 61d) hogares entre los que se incluyen 549 (Figura 61e) viviendas de calidad insuficiente.



a)



b)

Caracterización del impacto por inundación en una cuenca urbana

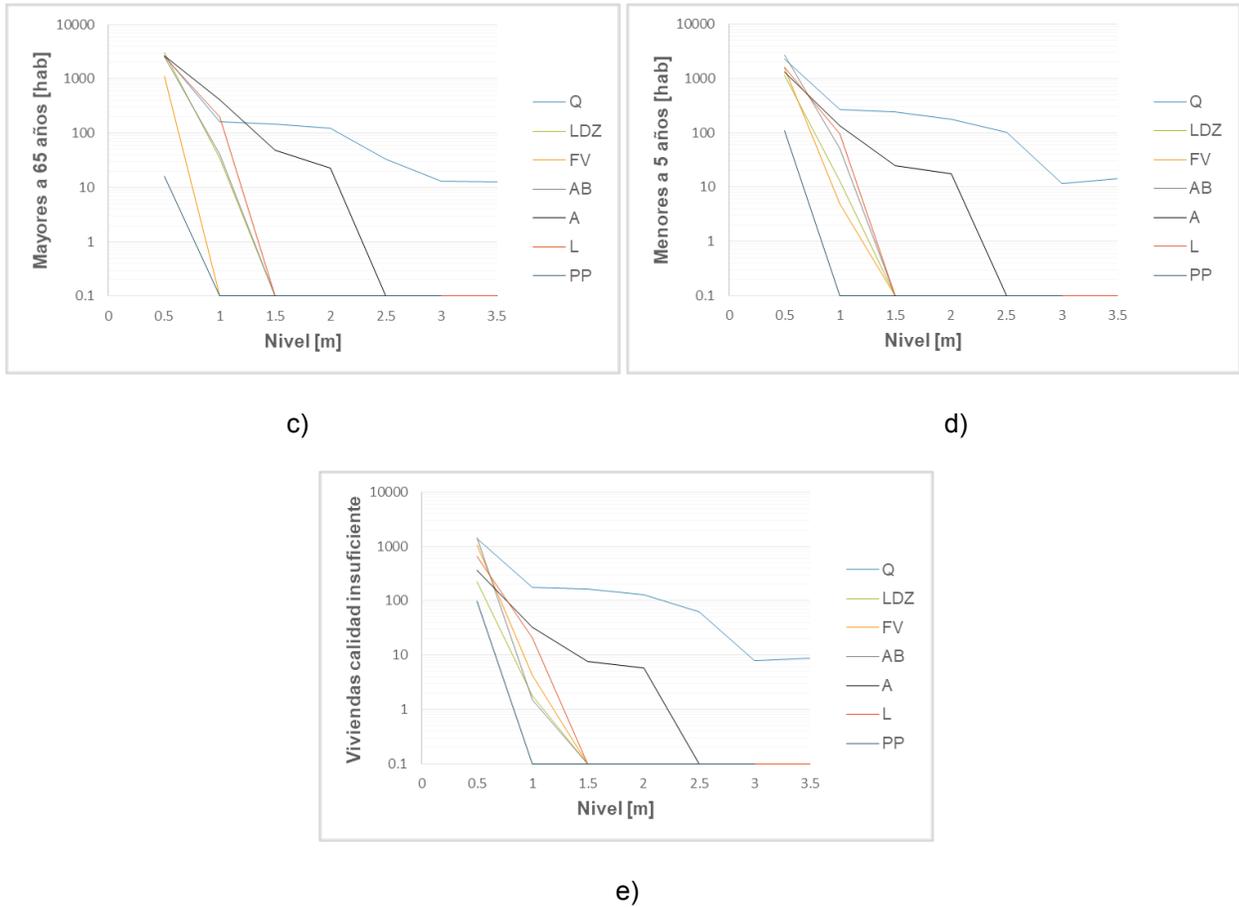


Figura 61.- Cuantificación de impactos por partidos. a)- Población total, b)- Hogares totales, c)- Mayores a 65 años, d)- Menores a 5 años y e)- Viviendas calidad insuficiente. Evento extremo extraordinario BSAS1985.

En un evento de estas características se estimó que unos 46 establecimientos educativos y 13 de salud presentarían ingreso de agua en edificios, y 39 establecimientos educativos y 8 de salud podrían presentar daños potenciales en bienes materiales (Tabla 21; Figura 62).

Tabla 21.- Establecimientos expuestos. Evento extremo extraordinario BSAS1985.

Establecimientos	Nivel menor a 0.3 m	Nivel entre 0.3 m y 0.6 m	Nivel mayor a 0.6 m
Educativos	452	46	39
Salud	87	13	8

Caracterización del impacto por inundación en una cuenca urbana

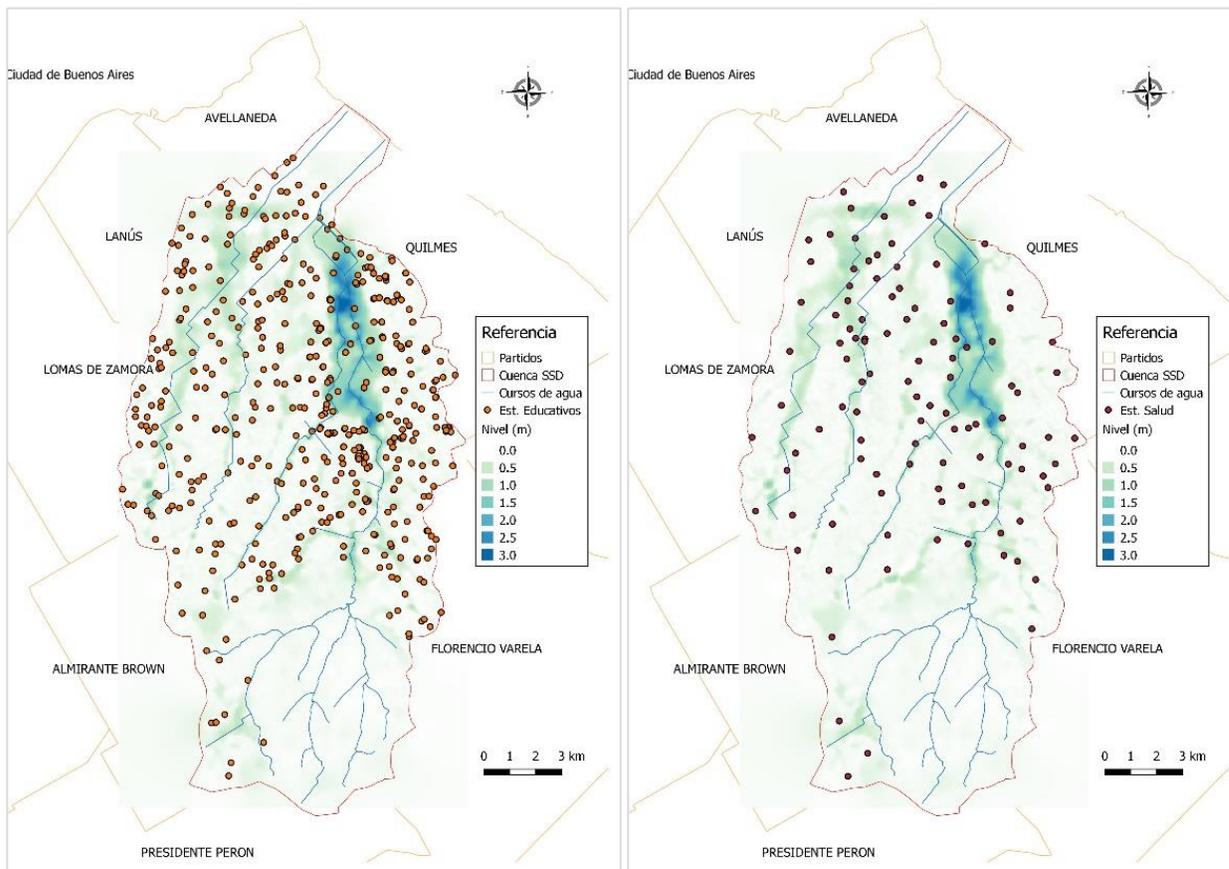
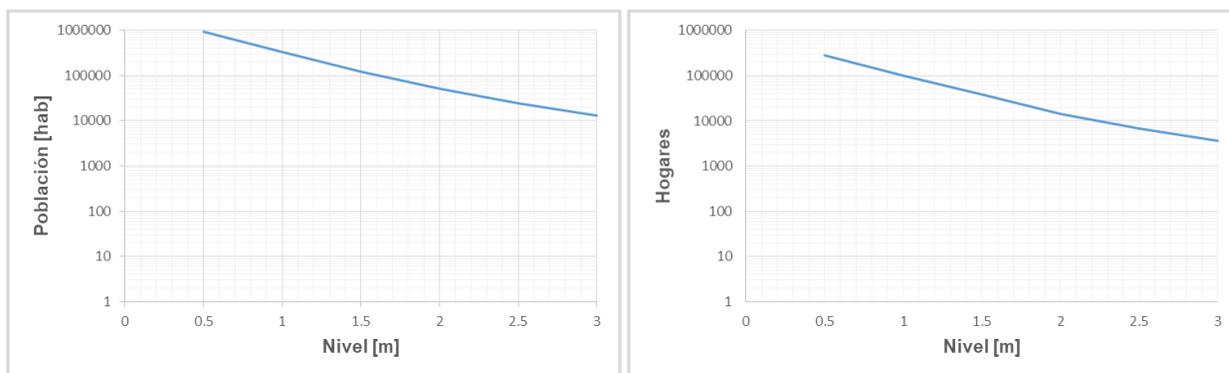


Figura 62.- Establecimientos expuestos a eventos extremos extraordinarios. BSAS1985.

En el caso de un evento extremo extraordinario de las características de LP2013 se estimó que aproximadamente 15000 personas pueden verse afectadas por alturas máximas de agua de 3 m (Figura 63a), 1900 hogares expuestos a niveles mayores a 2 m (Figura 63b), 5500 personas mayores de 65 años se podrían ver afectadas con niveles de agua máximos mayores a 0.5 m y 4300 menores a 5 años se verían afectados con niveles mayores a 0.5 m (Figuras 63c y 64d). En el caso de viviendas de calidad constructiva insuficiente se contabilizaron unas 500 viviendas afectadas por niveles de agua máximos mayores a 2 m (Figura 65e).



a)

b)

Caracterización del impacto por inundación en una cuenca urbana

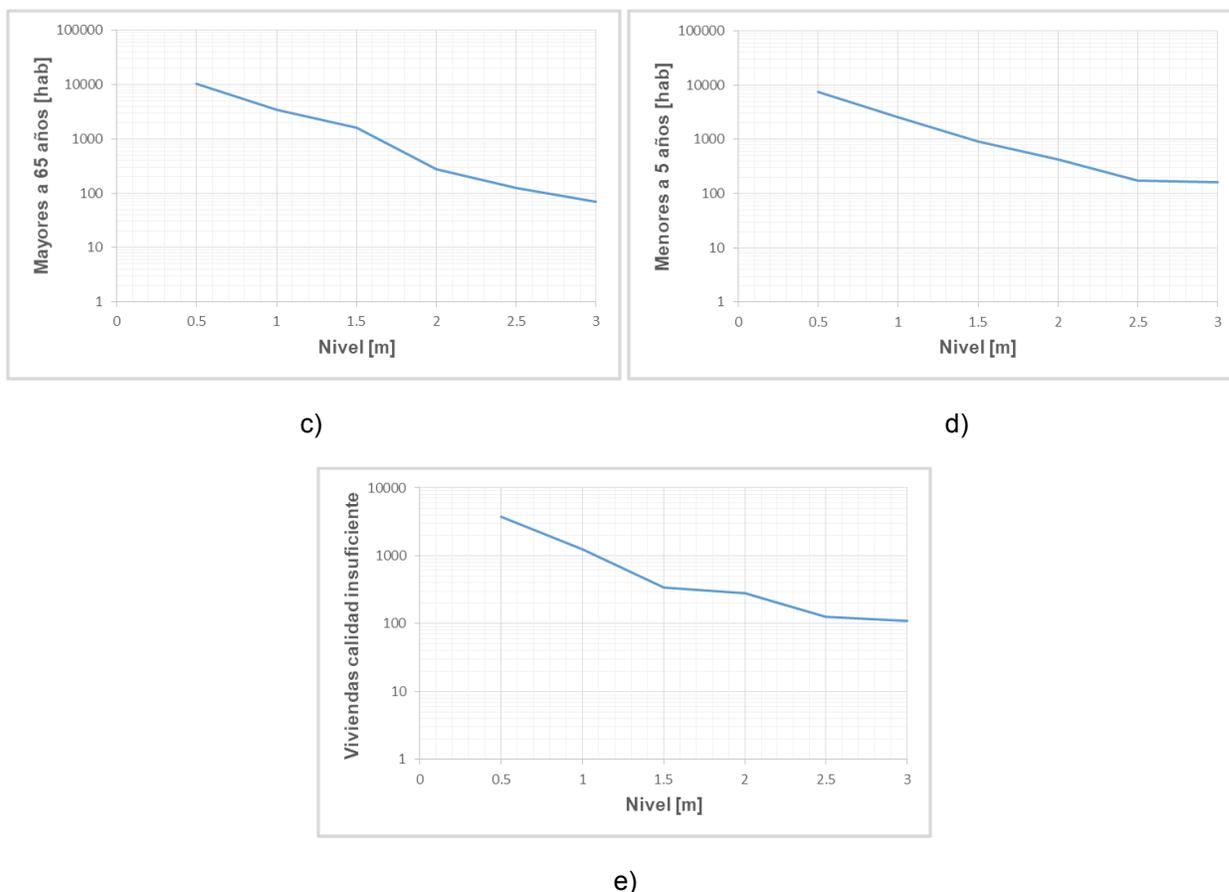


Figura 63.- Cuantificación de impactos. a)- Población expuesta, b)- Hogares expuestos, c)- Mayores a 65 años, d)- Menores a 5 años afectados por diferentes niveles de agua y e)- Viviendas calidad insuficiente

En el caso del evento extremo extraordinario LP2013 se obtienen porcentajes similares, alcanzándose un 92 % del área total afectada por niveles mayores a 2 m en el partido de Quilmes y un 8 % en el partido de Avellaneda (Tabla 22).

Tabla 22.- Origen de la población expuesta. Evento extremo extraordinario LP2013.

LP2013	Menos a 1 m	Entre 1 y 2 m	Más de 2 m
Quilmes	20 %	38 %	92 %
Lomas de Zamora	13 %	7 %	0 %
Lanús	13 %	14 %	0 %
Florencio Varela	14 %	5 %	0 %
Almirante Brown	30 %	6 %	0 %
Avellaneda	10 %	29 %	8 %
Presidente Perón	0 %	0 %	0 %

En la cuantificación de impacto social también la mayor afectación se concentraría en el partido de Quilmes contabilizándose 170000 (Figura 66a) personas afectadas potencialmente con niveles mayores a 0.5 m entre los que se incluyen 1025 (Figura 66b) mayores de 65 años y 1391 (Figura 66c) menores a 5 años, y 47000 (Figura 66d) hogares entre los que se incluyen 937 (Figura 66e) viviendas de calidad insuficiente.

Caracterización del impacto por inundación en una cuenca urbana

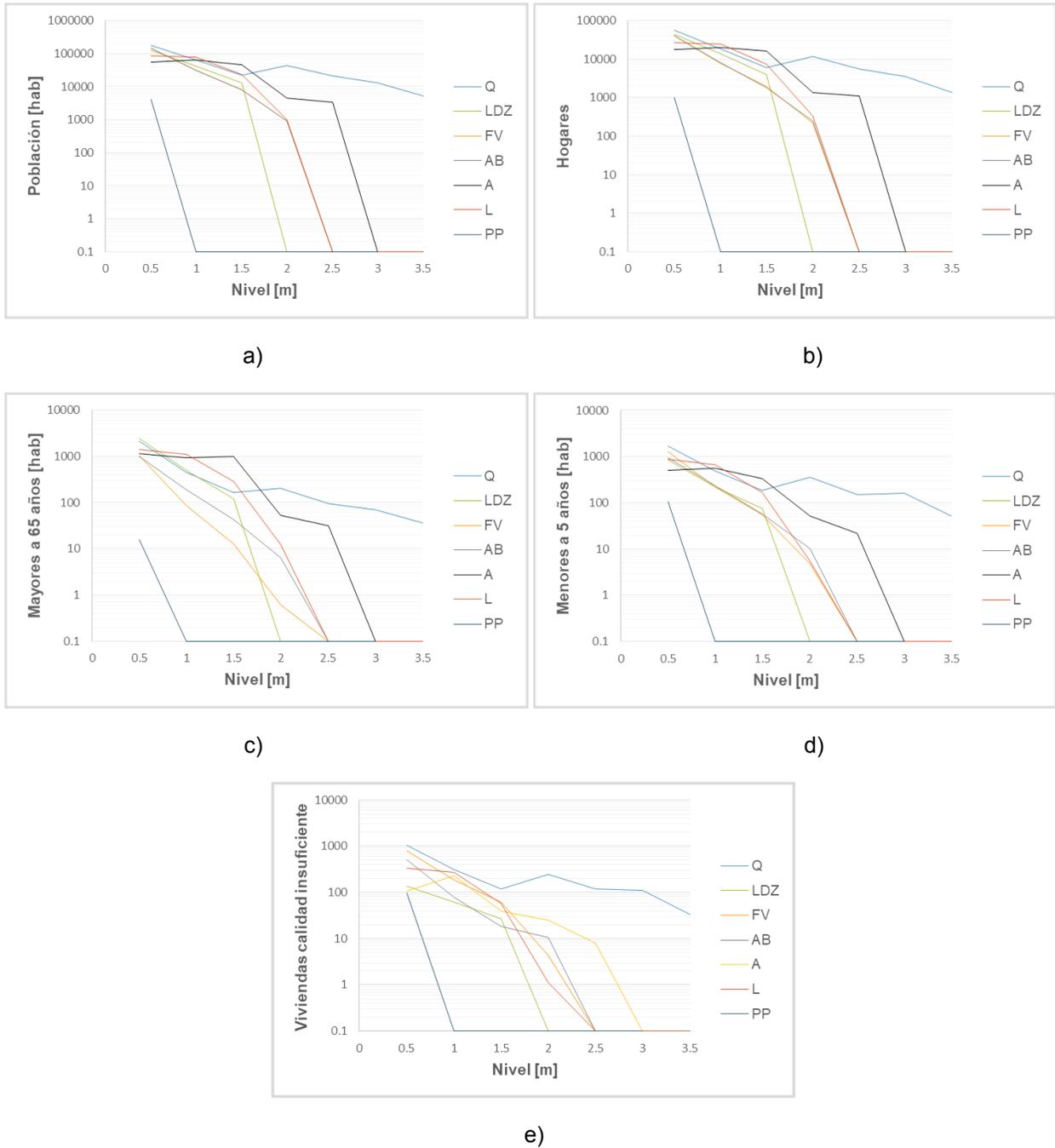


Figura 64.- Cuantificación de impactos por partidos. a)- Población total, b)- Hogares totales, c)- Mayores a 65 años, d)- Menores a 5 años y e)- Viviendas calidad insuficiente. Evento extremo extraordinario LP2013.

En un evento extremo extraordinario de estas características se estimó que 143 establecimientos educativos y 22 de salud presentarían problemas de ingreso de agua a los edificios. En tanto 154 establecimientos educativos y 41 de salud podrían presentar daños materiales (Tabla 23; Figura 67).

Tabla 23.- Establecimientos afectados. Evento extremo extraordinario LP2013.

Establecimientos	Nivel menor a 0.3 m	Nivel entre 0.3 m y 0.6 m	Nivel mayor a 0.6 m
Educativos	240	143	154
Salud	45	22	41

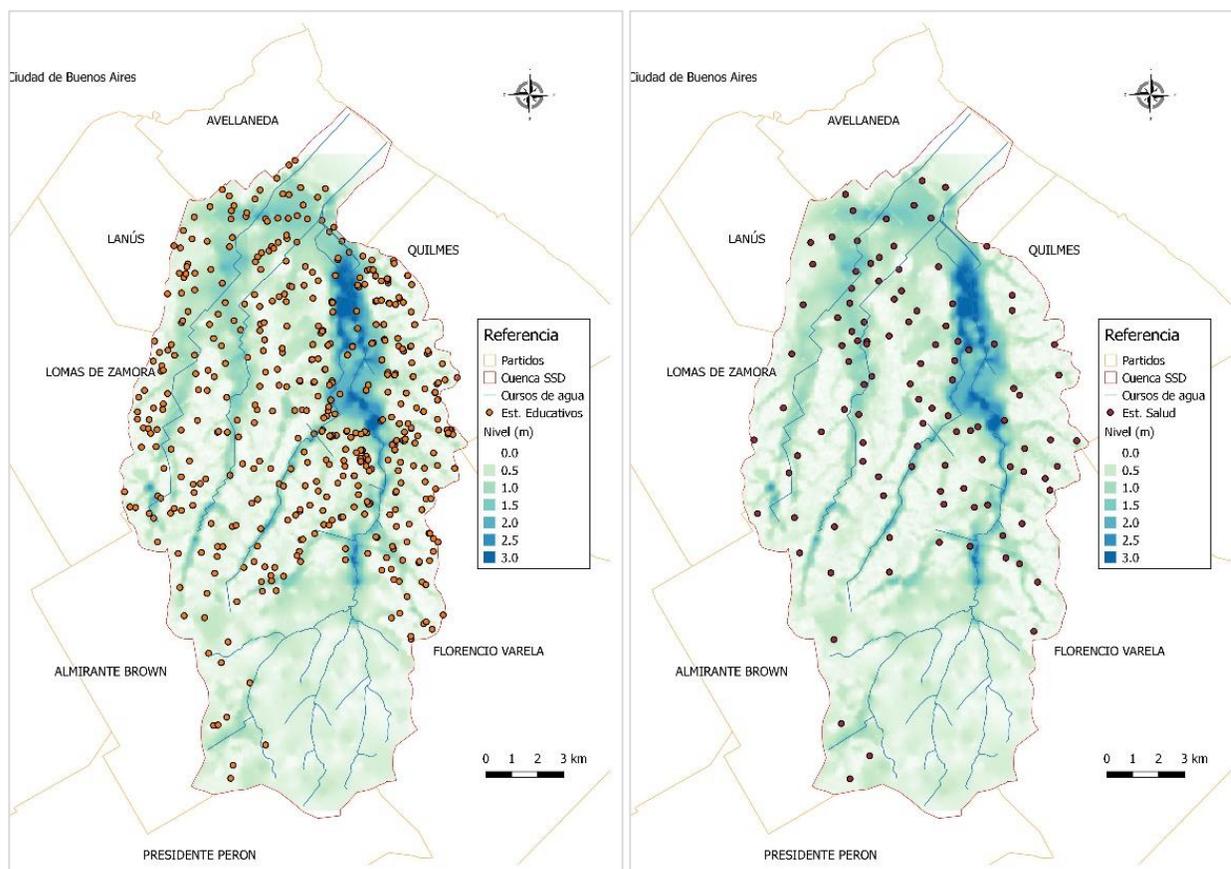


Figura 65.- Establecimientos afectados por eventos extremos extraordinarios. LP2013.

En el caso de un evento extremo ordinario de las características de SSD2018 se estimó que aproximadamente 1842 personas y 417 hogares se verían afectados por niveles mayores a 0.2 m. No se contabilizaron establecimientos educativos y de salud con niveles mayores a 0.3 m en calles, pero si con niveles mayores a 0.2 m lo cual puede acarrear dificultades en el acceso y en el normal funcionamiento por calles anegadas (Tabla 24).

Tabla 24.- Establecimientos expuestos. Evento extremo ordinario SSD2018

Establecimientos	Nivel menor a 0.2 m	Nivel mayor a 0.2 m
Educativos	530	7
Salud	107	1

El análisis de los indicadores permitió observar que las zonas críticas, respecto a eventos de inundación, presentan características socioeconómicas diferenciales y por ende

pueden sufrir impactos de distinto índole. Por ejemplo, en el caso del análisis del indicador de calidad constructiva de las viviendas se puede observar la presencia de viviendas más precarias localizadas mayoritariamente sobre las subcuencas de los arroyos Las Piedras y San Francisco, zona de mayor amenaza por altura máxima de inundación y altos tiempos de permanencia de agua sobre umbrales críticos. En tanto la presencia de mejor calidad de viviendas se encuentra sobre las subcuencas de los arroyos Galíndez y Las Perdices las cuales presentan menor nivel de amenaza. Con respecto a los grupos etarios que se analizaron se observa una mayor concentración de población menor a 5 años de edad en las subcuencas de los arroyos Las Piedras y San Francisco, y una presencia mayor de población mayor a 65 años en las subcuencas de los arroyos Galíndez y Las Perdices. En cuanto a la localización de los principales impactos se determinó que se producen principalmente sobre el partido de Quilmes, con lo cual es posible focalizar las acciones.

A su vez se verifica que hay afectaciones en centros de salud y establecimientos educativos, los cuales prestan servicios sociales básicos y son demandados ante eventos de inundación para la atención de personas y en casos de evacuación, por lo cual es fundamental determinar aquellos que presentan mayor exposición para contemplar estrategias de contingencia eficientes.

A partir de los resultados presentes, se observa la presencia de altos niveles de amenaza por inundaciones urbanas, las cuales afectan principalmente a grupos sociales con una alta densificación poblacional, elevados niveles de pobreza, que presentan escasa infraestructura de servicios básicos, deficiente calidad constructiva de viviendas, con irregularidades en la tenencia de la tierra que lleva a la ocupación de tierras sin vocación urbana, bajo nivel de educación y consecuentemente poco conocimiento de la génesis y desarrollo de las inundaciones y capacidad de respuesta a desastres prácticamente inexistente.

Estos hechos derivan en calles y viviendas inundadas, vías de comunicación paralizadas, cortes de energía, caminos de acceso de transporte obstruidos, población autoevacuada, problemas sanitarios y hasta casos de personas fallecidas. Estas consecuencias demandan altos costos económicos y sociales para tratar la emergencia y se desarrolla solo ocurrido el evento con poca acción pre y post evento.

4.3.- Impacto hidrológico por urbanización

4.3.1.- Escenario I

En el escenario actual (SSD2018) el caudal pico en el arroyo Sarandí fue de 18 m³/s y el caudal pico en el arroyo Santo Domingo 61 m³/s. En el escenario con 10 % más de impermeabilización de la cuenca, el caudal pico en el arroyo Sarandí fue de 18 m³/s, lo cual no implica cambios en el caudal erogado con respecto al escenario base y en el arroyo Santo Domingo fue 65 m³/s, lo cual implica un aumento del 7 % en el caudal erogado con respecto al escenario base.

En la Tabla 25 se puede observar el balance hidrológico obtenido, representando la escorrentía un 30 % de la precipitación en el escenario de referencia. En el escenario con 10 % más de impermeabilidad se produce un aumento del 4 % en la escorrentía y una disminución del mismo orden con respecto a la infiltración.

Tabla 25.- Balance hidrológico en diferentes escenarios.

Variable	Escenario Actual (mm)	Escenario 10 % más impermeabilidad (mm)
Precipitación total	64	64
Evaporación	4	4
Infiltración	41	38
Escorrentía	19	22

En los puntos A - LPB y A - SFB (Figuras 66 y 67), en el escenario de referencia se produjo un desborde del arroyo Las Piedras (profundidad aproximada de 2.25 m) y se llenó la sección en el arroyo San Francisco (profundidad aproximada de 2.40 m). En el caso del escenario con un 10 % más de impermeabilidad se observa un desborde mayor en el arroyo Las Piedras y presencia de desborde en el arroyo San Francisco, produciéndose un retardo en el primer pico de la onda de crecida que se ve compensado con un nivel mayor en el segundo pico de crecida.

En los puntos A – LPA y A – SFA (Figuras 68 y 69) se observa un comportamiento similar a los anteriormente descritos, no siendo significativo este cambio observado.

A partir de las series de niveles y caudales simulados se observa que la mayor sensibilidad de variación de niveles y caudales se produce en el punto de referencia 4, el cual se encuentra ubicado en el partido de Florencio Varela (Figura 70), produciéndose un efecto local principalmente.

Por último en los puntos A – S y A – SD (Figuras 71 y 72) se observa que se produce un retardo en la llega de la onda de crecida pero se ven poco modificados los caudales máximos observados ante un cambio en la impermeabilidad en los partidos de Almirante Brown y Florencio Varela.

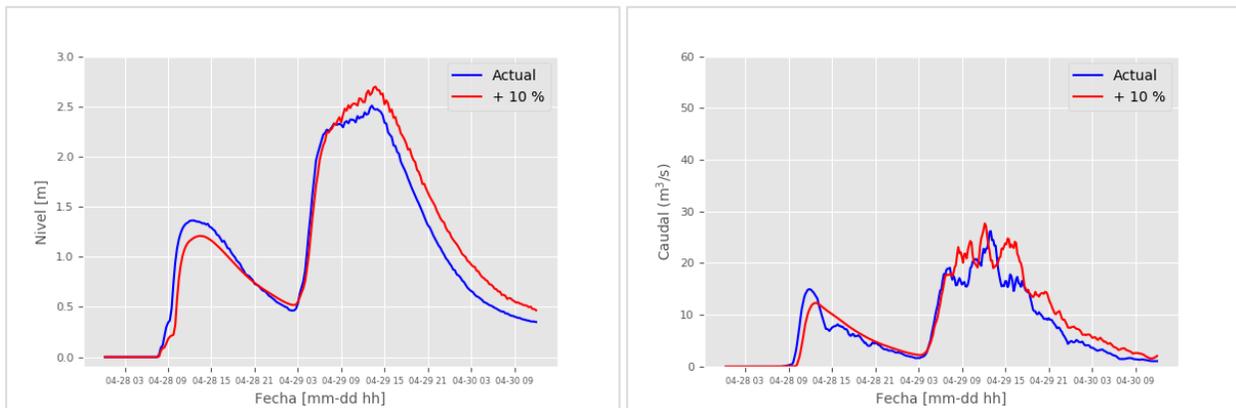


Figura 66.- Niveles y caudales simulados según diferentes escenarios propuestos. A - LPB.

Caracterización del impacto por inundación en una cuenca urbana

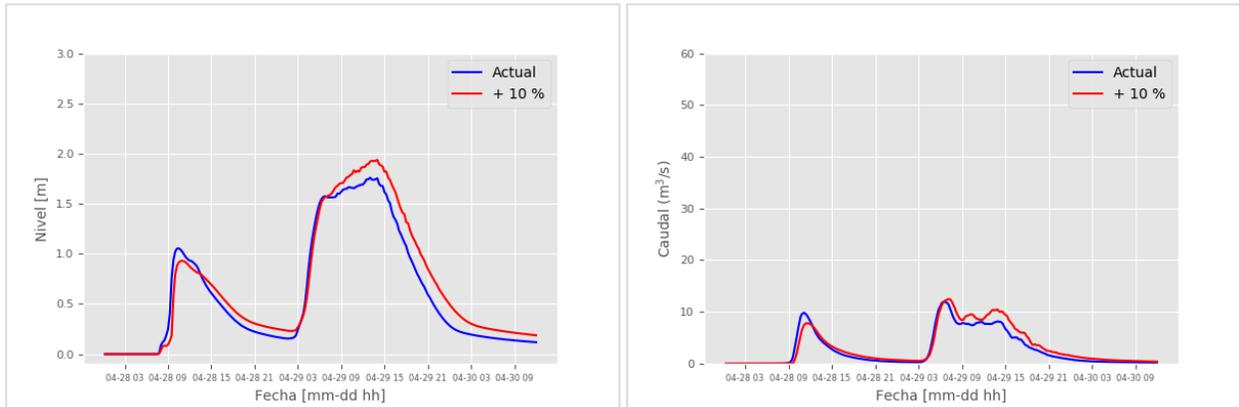


Figura 67.- Niveles y caudales simulados según diferentes escenarios propuestos. A - SFB.

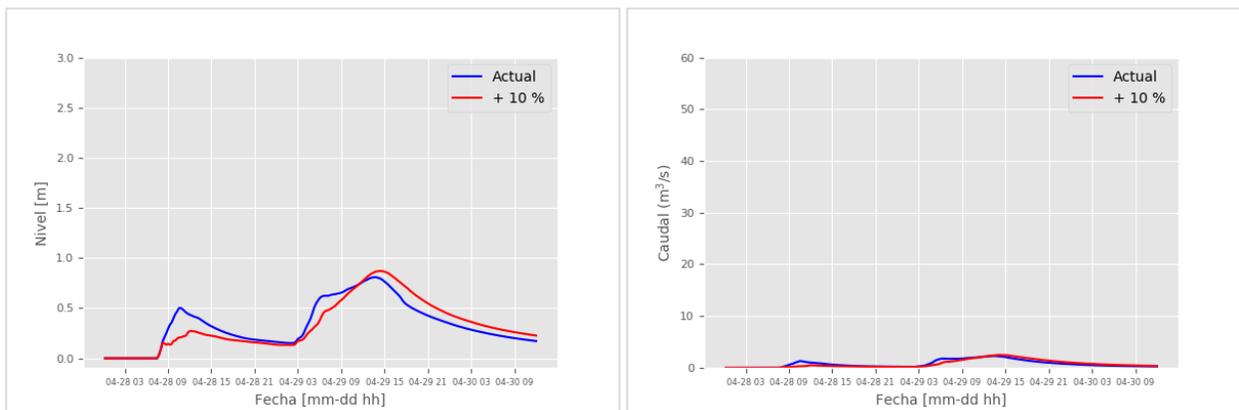


Figura 68.- Niveles simulados según diferentes escenarios propuestos. A - LPA.

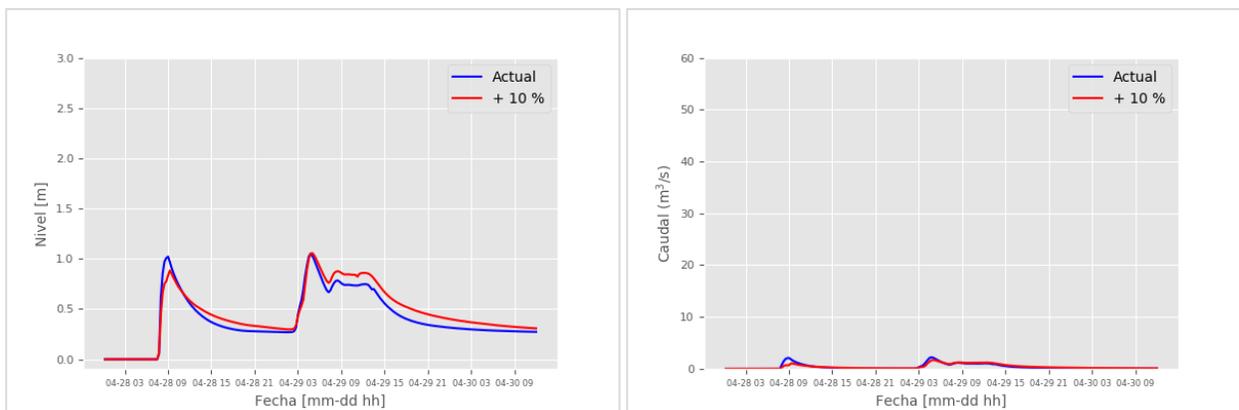


Figura 69.- Niveles simulados según diferentes escenarios propuestos. A - SFA.

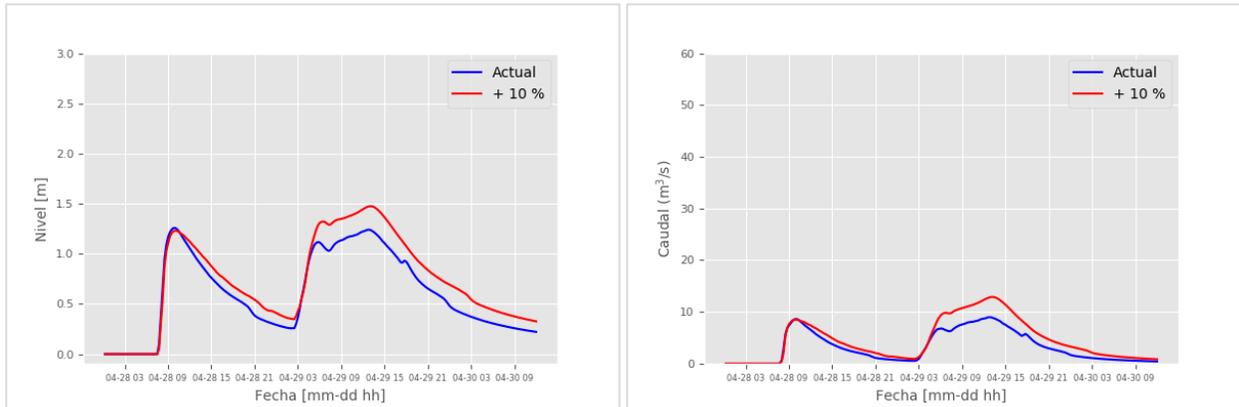


Figura 70.- Niveles simulados según diferentes escenarios propuestos. Punto de referencia 4

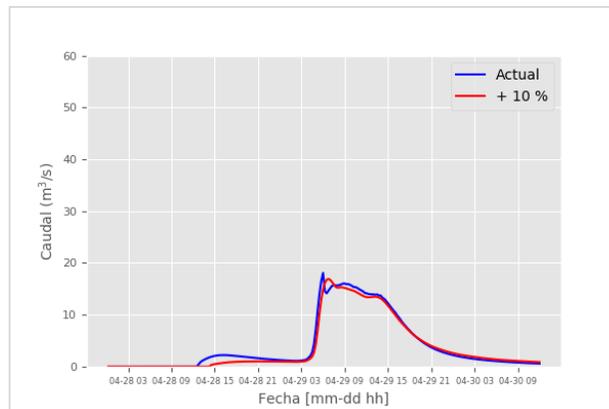


Figura 71.- Niveles simulados según diferentes escenarios propuestos. A – S.

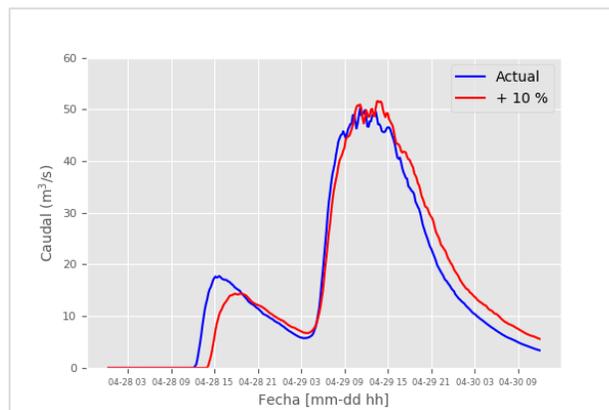


Figura 72.- Niveles simulados según diferentes escenarios propuestos. A – SD.

4.3.2.- Escenario II

En el escenario actual (SSD2018) el caudal máximo en el arroyo Sarandí fue de 18 m³/s y el caudal máximo en el arroyo Santo Domingo 61 m³/s. En el escenario con 10% más de impermeabilización de la cuenca, el caudal máximo en el arroyo Sarandí fue de 23 m³/s, lo cual implica un aumento del 29% en el caudal erogado con respecto al escenario base y en el arroyo Santo Domingo fue 78 m³/s, lo cual implica un aumento del 26% en el caudal erogado con

respecto al escenario base. En el escenario con 10% menos de impermeabilidad en la cuenca, el caudal máximo saliente en el arroyo Sarandí fue de 12 m³/s, lo que implica una reducción de un 35% con respecto al escenario base y en el arroyo Santo Domingo fue de 35 m³/s, lo que implica una reducción de 44% con respecto al caudal de referencia.

En la Tabla 26 se puede observar el balance hidrológico obtenido, representando la escorrentía un 30% de la precipitación en el escenario de referencia. En el escenario con 10% más de impermeabilidad se produce un aumento del 10% en la escorrentía y una disminución del 10% en el escenario con 10% menos de impermeabilidad.

Tabla 26.- Balance hidrológico en diferentes escenarios.

Variable	Escenario Actual (mm)	Escenario 10% más impermeabilidad (mm)	Escenario 10% menos impermeabilidad (mm)
Precipitación total	64	64	64
Evaporación	4	4	3
Infiltración	41	34	48
Escorrentía	19	26	13

Según los limnigramas simulados en A - LPB y A - SFB (Figuras 73 y 74), en el escenario de referencia se produjo un desborde del arroyo Las Piedras y se llenó la sección en el arroyo San Francisco. En el caso del escenario con un 10% más de impermeabilidad se observa un desborde mayor en el arroyo Las Piedras y presencia de desborde en el arroyo San Francisco. En el caso del escenario con 10% menos de impermeabilidad no se observa desborde en las secciones de ambos arroyos.

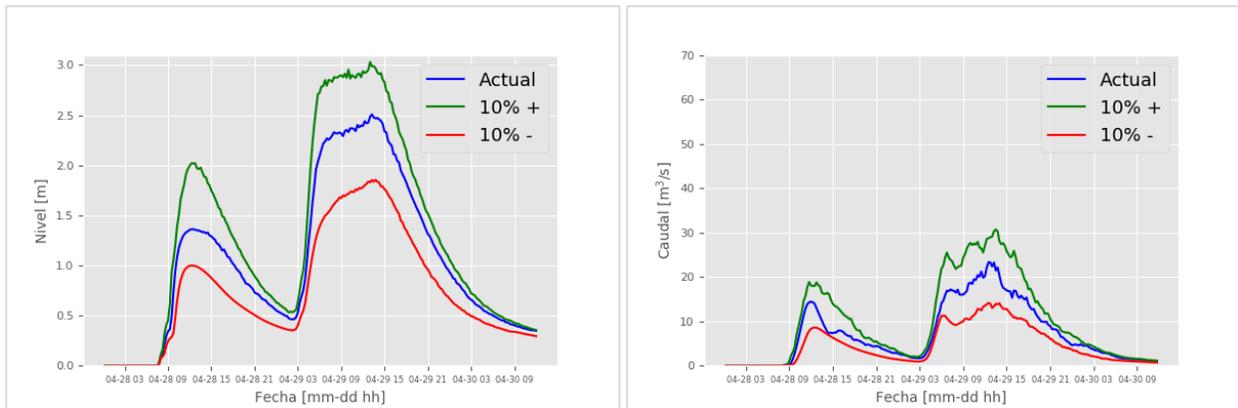


Figura 73.- Niveles simulados según diferentes escenarios propuestos. A - LPB.

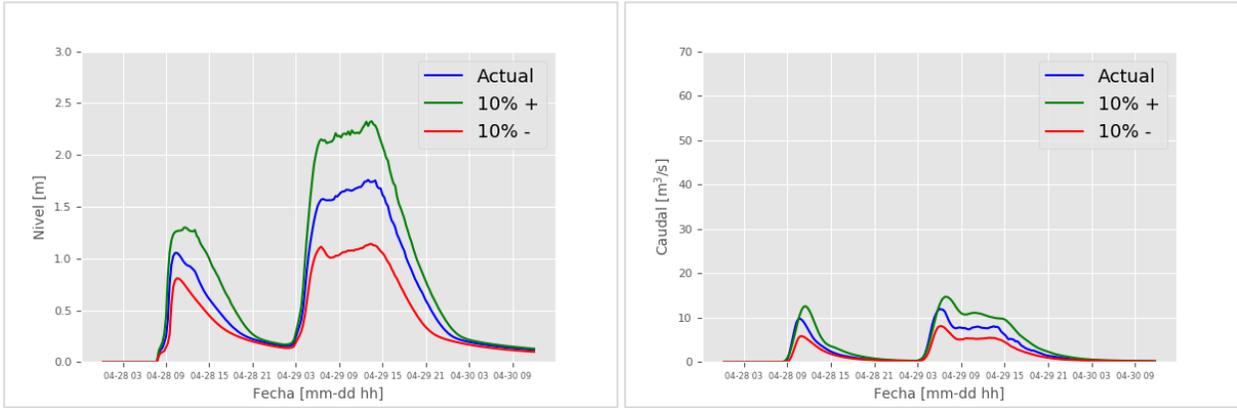


Figura 74.- Niveles simulados según diferentes escenarios propuestos. A - SFB.

Según los limnigramas simulados en A - LPA (Figura 75), la respuesta observada de acuerdo a los cambios de impermeabilidad planteados no causan mayores variaciones de nivel en el caso de un aumento de la impermeabilidad en la cuenca de aporte. En el caso de los limnigramas simulados en A - SFA (Figura 76), las variaciones de nivel son proporcionales a la modificación en la impermeabilidad de la cuenca de aporte. Este comportamiento diferencial en la sensibilidad a los cambios de impermeabilidad puede estar relacionado a la presencia de una cuenca de aporte poco urbanizada en el caso de A - LPA en relación a A - SFA. La sensibilidad de caudales en A - S y A - SD (Figuras 77 y 78) muestra un comportamiento proporcional al cambio de impermeabilidad en las cuencas de aporte.

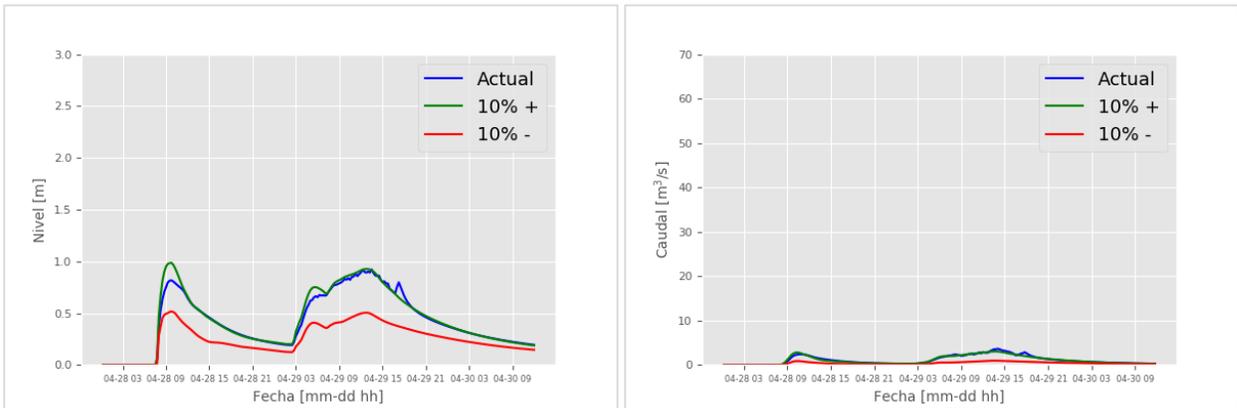


Figura 75.- Niveles simulados según diferentes escenarios propuestos. A - LPA.

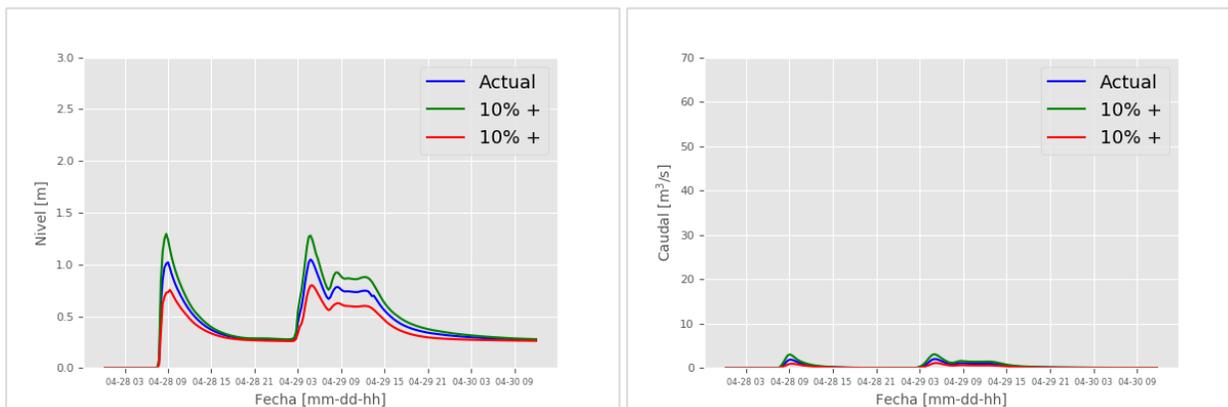


Figura 76.- Niveles simulados según diferentes escenarios propuestos. A - SFA.

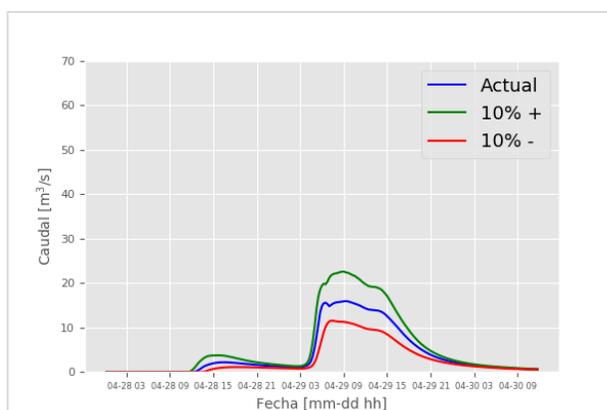


Figura 77.- Caudales simulados según diferentes escenarios propuestos. A – S.

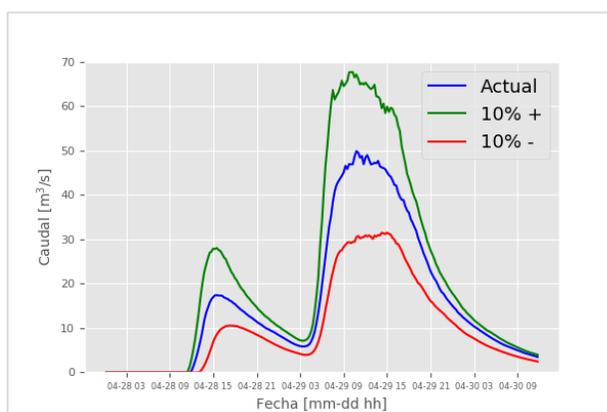


Figura 78.- Caudales simulados según diferentes escenarios propuestos. A – SD.

4.4.- Impacto hidrológico por actividad productiva

Para un evento extremo ordinario de las características evaluadas y las condiciones hidrológicas planteadas, como se puede observar en las Figuras 79 y 80 el efecto producido por un avance de las explotaciones ladrilleras en la cuenca alta producirían un aumento de niveles y caudales en el arroyo Las Piedras de manera local, no viéndose afectados significativamente los niveles y caudales hacia aguas abajo.

Caracterización del impacto por inundación en una cuenca urbana

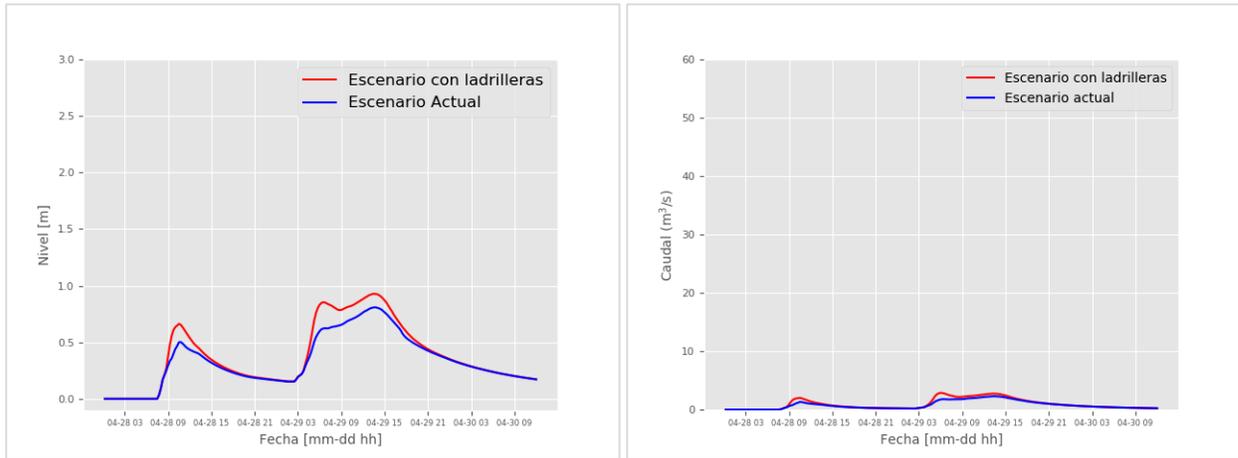


Figura 79.- Nivel en el arroyo Las Piedras. A - LPA, escenario base y con ladrilleras.

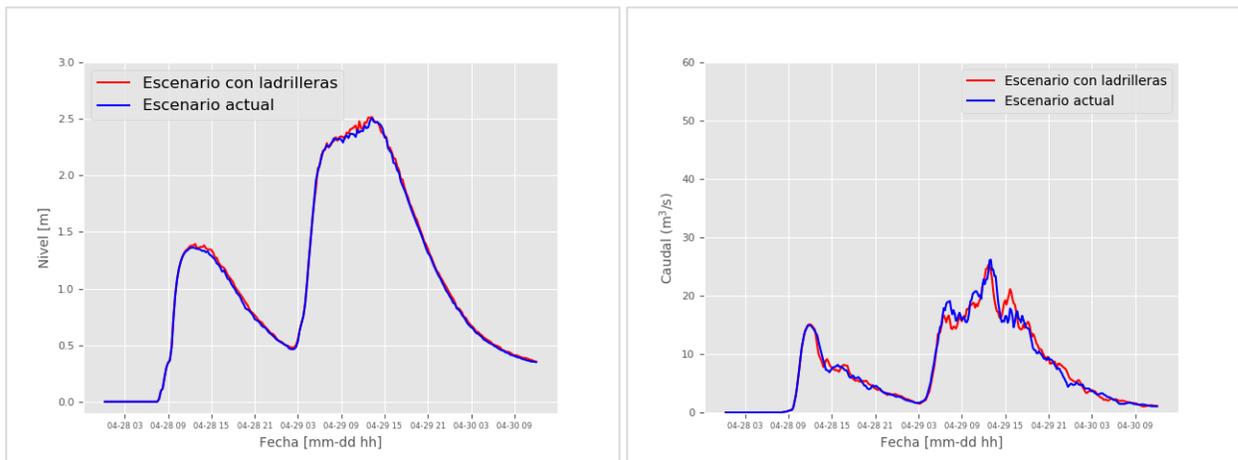


Figura 80.- Nivel en el arroyo Las Piedras. A - LPB, escenario base y con ladrilleras.

A su vez se verificó los cambios producidos en el caudal en las desembocaduras de los arroyos Sarandí y Santo Domingo (Figuras 81 y 82 respectivamente), observándose igual que en el caso de la comparación de niveles, que no se producen variaciones significativas en el caudal pico simulado.

Caracterización del impacto por inundación en una cuenca urbana

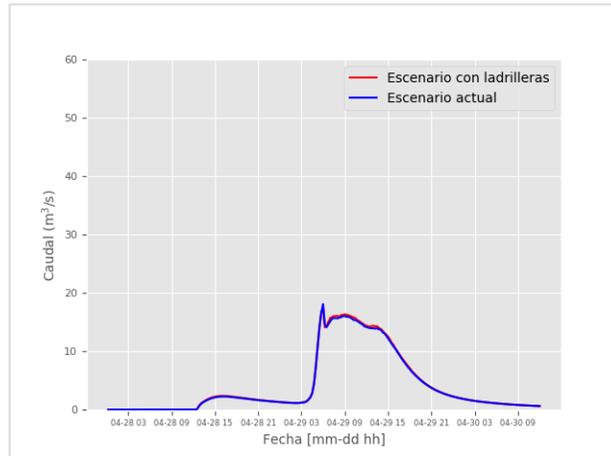


Figura 81.- Caudal en el arroyo Sarandí. A - S, escenario base y con ladrilleras.

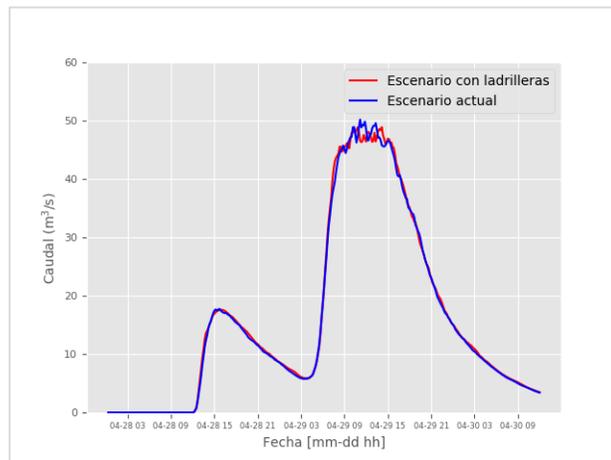


Figura 82.- Caudal en el arroyo Santo Domingo. A - SD, escenario base y con ladrilleras.

5.- CONCLUSIONES

En el trabajo desarrollado se pudo avanzar en la comprensión de la ocurrencia de eventos extremos extraordinarios de precipitación, corroborando que los impactos sociales y físicos producidos son considerables, avanzando en el desarrollo de una metodología que permite evaluar y cuantificar las consecuencias potenciales por la ocurrencia de inundaciones urbanas, convirtiéndose en una herramienta de importancia al momento de evaluar la implementación de medidas de contingencia. Ésta también se pudo utilizar ante la ocurrencia de precipitaciones extremas ordinarias, las cuales suelen afectar periódicamente a la población de la cuenca Sarandí – Santo Domingo, y producen impactos recurrentes a lo largo del tiempo.

La forma en que se manifiestan las inundaciones urbanas son particulares en cada territorio, presentándose relaciones multicausales que determinan impactos diferenciales. En el caso de las cuencas urbanas de la RMBA puede considerarse que presentan una serie de problemáticas comunes.

Para lograr los objetivos planteados fue necesario optar por la modelación numérica como herramienta indispensable para la comprensión de la dinámica hídrica de la zona, la cual se complementó con la instalación de instrumental hidrométrico (pluviómetros y sensores de nivel) para verificar la adecuada representación del sistema por parte del modelo hidrológico e hidráulico y avanzar en el proceso de calibración y validación. Para la calibración se utilizó un evento de precipitación que generó impactos locales por inundación y, en el caso de la validación se trabajó con cuatro eventos ocurridos en la cuenca calculándose indicadores de performance para cuantificar el grado de ajuste entre los eventos simulados y observados.

Los resultados obtenidos permitieron verificar que las zonas con alta amenaza por inundaciones urbanas por niveles de agua se presentan principalmente en la confluencia de los arroyos San Francisco y Las Piedras, una zona tradicionalmente industrial con grandes extensiones de espacios verdes que se urbanizó desordenadamente en las últimas décadas, pudiendo alcanzar niveles máximos en torno a los 3 m (durante eventos extremos extraordinarios). Los tiempos de permanencia de agua por sobre umbrales determinados están asociados a las zonas con mayores niveles de agua, alcanzando tiempos de hasta 48 horas. En el caso de la determinación de velocidades máximas en calles, estas están asociadas a zonas cercanas a los principales cursos de agua y no se presentan en simultáneo con los niveles máximos de agua determinados. A partir de la implementación de la inclusión del indicador de niveles de severidad, que evalúa vuelco y deslizamiento en personas, se obtuvo que los mayores niveles de severidad ocurren en los puntos de referencia ubicados sobre el arroyo San Francisco.

Las zonas que presentan altos niveles de amenaza por inundaciones urbanas con niveles de agua máximos y permanencia son congruentes con zonas que presentan alta densidad poblacional, grupos etarios vulnerables y condiciones de habitabilidad precarias (incluso presencia de asentamientos informales). Se pudo analizar que la mayor parte de los impactos ocurridos se concentran en la zona oeste del partido de Quilmes, lo cual permite definir prioridades en la implementación de acciones.

La cuantificación de impactos por eventos extremos extraordinarios permitió verificar que ante la ocurrencia de un evento extremo extraordinario de las características de BSAS1985 se ven afectadas unas 1500 personas con niveles en torno a los 3 m, 2000 hogares y 500 viviendas de calidad constructiva deficiente con niveles mayores a 2 m, 1300 mayores a 65

años y 1200 menores a 5 años con niveles mayores a 0.5 m. A su vez se cuantificó que 39 establecimientos educativos y 8 de salud presentan niveles mayores a 0.6 m.

Ante la ocurrencia de un evento extraordinario de las características de LP2013 se ven afectadas 15000 personas con niveles en torno a los 3 m, 1900 hogares y 500 viviendas calidad insuficiente con niveles mayores a 2 m, 5500 mayores a 65 años y 4300 menores a 5 años con niveles mayores a 0.5 m. A su vez se cuantificó que 154 establecimientos educativos y 41 de salud presentan niveles mayores a 0.6 m.

Si bien los impactos ocasionados por eventos extremos extraordinarios en cuencas urbanas en general son considerables, la cuantificación de ellos permite avanzar en el desarrollo de acciones preventivas o de contingencia con el objetivo de gestionar el riesgo por inundaciones urbanas.

En el caso del evento ordinario de las características de SSD2018 se cuantificó que 1850 personas y 420 hogares se verían afectados con niveles mayores a 0.2 m, 7 establecimientos educativos y 1 establecimiento de salud se verían afectados con niveles mayores a 0.2 m, afectando su normal funcionamiento.

En este marco, además se trabajaron dos problemáticas ambientales presentes en la cuenca Sarandí – Santo Domingo que se corroboró que intensifican los impactos generados por inundaciones urbanas:

- A partir del análisis de imágenes satelitales a lo largo del tiempo se cuantificó el grado de urbanización en los partidos que abarcan la cuenca, verificándose que los partidos de Florencio Varela y Almirante Brown presentaron un aumento en torno al 100% en el grado de urbanización en el periodo 1985 – 2015, siendo los dos partidos con mayor extensión de zona rural y por lo tanto con potencialidad para la implementación de acciones en el territorio.
En primer lugar la densificación de la urbanización en cuencas urbanas, principalmente en los partidos de Florencio Varela y Almirante Brown, lo cual disminuye las superficies con capacidad de infiltración. Este proceso se verificó al simular un aumento del 10 % en la impermeabilización en estos dos partidos, lo cual generó aumentos en los niveles y caudales picos principalmente en áreas locales situadas en zonas cercanas a los cambios físicos y en A – LPB y A - SFB. Ante este escenario aumenta un 4% el volumen escurrido y se produce un aumento de un 7% en el caudal máximo en A – SD.
- En segundo lugar una densificación de la urbanización en todos los partidos presentes en la cuenca. Este proceso se verificó al simular un aumento y un descenso del 10% en la impermeabilización de los partidos. En este escenario la esorrentía generada es directamente proporcional a los cambios de impermeabilidad planteados. Ante un aumento del 10% de impermeabilidad en todos los partidos el caudal máximo en A - S fue un 29% mayor. En A – SD este aumento representa un 26%. Ante un descenso del 10% de impermeabilidad se produce un descenso del 35% del caudal máximo en el A - S y de un 44% en A - SD. Ante un aumento del 10% en la impermeabilidad hay presencia de desborde en A – LPB y A – SFB.
- En tercer lugar la expansión de actividades productivas de alto impacto ambiental en el área rural de la cuenca Sarandí – Santo Domingo. Para ello se simuló la expansión de ladrilleras en la zona de influencia de la actividad productiva

actualmente. Como resultado se puede observar que los efectos hidrológicos se presentan de manera local en la zona A - LPA, con aumento del 15% en el nivel máximo y un 25% en el caudal máximo.

A partir de lo analizado en este trabajo se observa la presencia de una cuenca urbana con problemas estructurales en aspectos socioeconómicos y ambientales, en la cual existe poco conocimiento de la dinámica de inundaciones por parte de la población expuesta y gestores del riesgo, el desarrollo de obras hidráulicas de manera aislada en el territorio, ausencia de planes de ordenamiento territorial a escala de cuenca y asentamientos informales de población con poco conocimiento de las amenazas presentes en el territorio, nula instrumentación de cursos de agua, manejo integral deficiente de los residuos sólidos urbanos, presencia de vertidos industriales y domésticos sobre cursos de agua, entre otros. La ocurrencia de inundaciones con agua contaminada genera problemas sanitarios graves en la población ya que se ve agravada por la vulnerabilidad social presente. Esta temática no se abordó en el trabajo pero resulta fundamental avanzar en la búsqueda de soluciones integrales que contemplen la complejidad de la problemática.

La presencia de esta situación conlleva a una intensificación de las causas que originan las inundaciones, deviniendo en un aumento de los impactos sociales y físicos y consecuentemente en un gasto en asistencia social mayor que el necesario destinado a la mitigación del riesgo de inundación.

Si bien la situación actual de la cuenca Sarandí – Santo Domingo es frágil ante la ocurrencia de eventos extremos de inundación ordinarios y extraordinarios, actualmente hay participación activa de grupos sociales organizados para avanzar en la comprensión de los riesgos a los que se encuentra expuesta la sociedad. Se conformó recientemente un comité de cuenca destinado a afrontar los principales problemas presentes, existen aún áreas naturales que pueden destinarse a la implementación de medidas de mitigación y se encuentra disponible un modelo hidrológico – hidráulico que permite estudiar diferentes escenarios planteados.

De este modo surge la necesidad de avanzar en la instrumentación para la medición de variables hidrológicas para contemplar la variabilidad espacial y temporal de las inundaciones urbanas, el desarrollo de planes de evacuación que contemplen la educación e información de los actores involucrados y los establecimientos aptos para albergar a la población, y la explotación del modelo hidrológico e hidráulico como herramienta fundamental en el proceso de toma de decisiones.

6.- BIBLIOGRAFÍA

Alley, W. M., y Veenhuis, J. E., 1983. Effective impervious area in urban runoff modeling. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(2), 313-319.

Angheben, E., 2012. Estudio ecohidrológico de la cuenca urbana de La Cava de Villa Itatí, Quilmes, provincia de Buenos Aires. Tesis de maestría, Universidad Nacional de La Plata.

Área ambiental Unidad de Coordinación Nacional del Programa Mejoramiento de Barrios (PROMEBA), 2002. Subsecretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda de la nación. "Documento Ambiental de la muestra de Conurbano Bonaerense".

Auge, M.P., 1990. Aptitud del agua subterránea en La Plata, Argentina. Seminario Latinoamericano de Medio Ambiente y Desarrollo. Actas: 191-201. Bariloche.

Auge, M. P., 2005. Hidrogeología de La Plata, Provincia de Buenos Aires. In *Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino* (pp. 293-311). La Plata: Quick Press.

Bacchiega, J.D., Lopardo, M.C. y Lopardo, R.A., 2015. Extreme flood events due to intense rainfall in urban zones. Learning of recent disasters in Argentina. E-proceedings of the 36th IAHR World Congress, 28 June – 3 July, 2015, The Hague, The Netherlands.

Barrenechea, J., Gentile E., González, S. y Natenzon, C., 2003. Una propuesta metodológica para el estudio de la vulnerabilidad social en el marco de la teoría social del riesgo. En S. Lago Martínez, G. Gómez Rojas y M. Mauro (comp.): *En torno a las metodologías. Abordajes cualitativos y cuantitativos*. Buenos Aires, Editorial Proa.

Barros V. R., Castañeda M. E. y Doyle M. E., 2000. Recent precipitation trends in Southern South America East of the Andes: an indication of climatic variability. In: Smolka PP, Volkheimer W (eds) *Southern hemisphere paleo- and neoclimates. Key sites, methods, data and models*. Springer, Berlin, pp 187–206.

Barros V. R., Doyle M. y Camilloni I., 2008. Precipitation trends in Southeastern South America: relationship with ENSO phases and the low-level circulation. *Theor Appl Climatol Theoretical* 93:19–33

Barros V. y Mattio H., 1977/1978: Tendencias y fluctuaciones en la precipitación de la región patagónica. *Meteorológica*, 8/10, 237-246.

Bertoni, J. C., Ambrosino, S., Barbeito, O., Daniele, A., Maza, J. A., Paoli, C. U., y Serra, J. J. , 2004. Inundaciones urbanas en la Argentina. GWP-SAMTAC; Programa Asociado de Gestión de Crecidas; Universidad Nacional de Córdoba. Secretaría de Ciencia y Técnica, SECyT; Comité Permanente de los Congresos Nacionales del Agua, Argentina; Arg CAP-NET.

Braud, I., Breil, P., Thollet, F., Lagouy, M., Branger, F., Jacqueminet, C. y Michel, K., 2013. Evidence of the impact of urbanization on the hydrological regime of a medium-sized periurban catchment in France. *Journal of hydrology*, 485, 5-23.

Boulanger J.P., Leloup J., Penalba O.C., Rusticucci M.M., Lafon F. y Vargas W.M., 2005. Observed precipitation in the Paraná -Plata hydrological basin: Long-term trends, extreme conditions and ENSO teleconnections. *Clim Dyn.*, 24, 393-413

- Cannon, T., 2003. Vulnerability Analysis, Livelihoods and Disasters Components and variables of vulnerability: modelling and analysis for disaster risk management. IADB/IDEA Program on Indicators for Disaster Risk Management, <http://idea.unalmz.edu.co> Universidad Nacional de Colombia, Manizales.
- Castañeda, M. y Barros V., 1994. Las tendencias de la precipitación en el cono sur de América al este de los Andes, *Meteorológica*, XIX, 23-32.
- Castañeda, M. y Barros, V., 2001. Tendencias de la precipitación en el oeste de Argentina. *Meteorológica*, 26, 5-24.
- Chen, A.S., Leandro, J. y Djordjević, S., 2015. Modelling sewer discharge via displacement of manhole covers during flood events using 1D/2D SIPSON/P-DWave dual drainage simulations. *Urban Water Journal*. DOI:10.1080/1573062X.2015.1041991.
- Chow, V.T., 1959. *Open-Channel Hydraulics*, McGraw-Hill, NY.
- Ciappesoni, H., y Salio, P., 1997. Pronóstico de sudestada en el Río de la Plata. *Meteorológica*, 22(2), 67-81.
- Crawford, N.H. y Linsley, R.K., 1966. *Digital Simulation in Hydrology: Stanford Watershed Model IV*. Tech Report No. 39, Civil Engineering Department, Stanford University, Palo Alto, CA.
- Davis, I., 2003. "The Effectiveness of Current Tools for the Identification, Measurement, Analysis and Synthesis of Vulnerability and Disaster Risk", IADB/IDEA Programa de Indicadores para la Gestión de Riesgos, <http://idea.unalmz.edu.co>, Universidad Nacional de Colombia, Manizales.
- Di Pace M. y Bartrons, H.C., 2004. *Ecología Urbana*. Capítulo 2: Ecología y Ambiente, en: *Ecología de la ciudad*. Editorial Prometeo. Buenos Aires.
- Dirección Provincial de Servicios Públicos de Agua y Cloacas (DPSPAyC), 2014. *Plan Estratégico de Agua y Saneamiento de la Provincia de Buenos Aires*. Ministerio de Infraestructura, Buenos Aires. Argentina.
- Efron, S. T., Aquino, J. E., de Cabo, L. I., Dos Santos Afonso, M., y Graziano, M., 2014. Evaluación de la capacidad de auto-depuración de un arroyo urbano y el uso de macrófitas nativas como estrategia de restauración. *Biología Acuática* No 30, pp. 275-285.
- Engman, E.T., 1986. Roughness Coefficients for Routing Surface Runoff. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 112, No. 1, pp. 39-53.
- Escobar, G., Vargas, W., y Bischoff, S., 2004. Wind tides in the Rio de la Plata estuary: meteorological conditions. *International Journal of Climatology*, 24(9), 1159-1169.
- Escuder Bueno, I., Morales-Torres, A., Castillo-Rodríguez, J., Perales-Momparler, S., Ortner, S., Jöbstl, C., Knoblauch H., Natale L. y Petaccia, G., 2011. SUFRI Methodology for pluvial and river flooding risk assessment in urban areas to inform decision making. *WP3 Final Report, SUFRI project (Sustainable Strategies of Urban Flood Risk Management)*.
- Escuder Bueno, I., Castillo-Rodríguez, J. T., Zechner, S., Jöbstl, C., Perales-Momparler, S., y Petaccia, G., 2012. A quantitative flood risk analysis methodology for urban areas with integration of social research data. *Natural hazards and earth system sciences*, 12(9), 2843-2863.

Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas (EIRD/ONU), 2005. Marco de Acción de Hyogo 2005-2015. Aumento de la resiliencia de las naciones y las comunidades ante los desastres: Introducción al Marco de Acción de Hyogo.

EPA, 2005. User's Manual, SWMM 5.0. Environmental Protection Agency, EPA, USA.

Fenoglio, E., Rallo, M.E., Peralta, M., Michemberg, X., Palacios, E., Marín, N.C., Argerich, M., Abas, M., del Castillo, S., Bizzozero, N. y Corvaro, M.T., 2015. Inundaciones Urbanas y Cambio Climático. Recomendaciones para la Gestión". Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Buenos Aires, Argentina.

Fernández, L., Herrero, A. C. y Martín I., 2009. Alteración de servicios ecológicos del urbanismo privado en la región metropolitana de Buenos Aires [En línea]. XI Jornadas de Investigación del Centro de Investigaciones Geográficas y del Departamento de Geografía, 12 y 13 de noviembre de 2009, La Plata. Disponible en: http://www.fuentesmemoria.fahce.unlp.edu.ar/trab_eventos/ev.818/ev.818.pdf

Fletcher T. D., Andrieu H. y Hamel, P., 2013. Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters; a state of the art review. *Adv. Water Resources*. 51, pp. 261-279.

Forciniti, E., Ghilardi, P., y Petaccia, G., 2011. Application of SUFRI Methodology for the reduction of Flood Risk in Lodi Town (Italy). Departamento de Hidráulica e Ingeniería Ambiental, Universidad de Pavia, Italia.

García N.O. y Vargas W. M., 1998. Análisis de la variabilidad climática en la Cuenca del Río de la Plata, a través de sus caudales y búsqueda de precursores de extremos hídricos. Reporte Final del Proyecto de la Comunidad Europea "Assessing the impact of future climatic change on the water resources and the hydrology of the Río de la Plata Basin, Argentina. Contract N° ARG/B7- 3011/94/25, 1999.

García Rojo, F., Re, M., Kazimierski, L. D. y Badano, N. D., 2016. Validación de un modelo hidrológico-hidráulico en una cuenca urbana con información generada por los afectados a inundaciones. 3° Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos. Ezeiza, Argentina.

Giordano, L., Ruggerio, C., Flores, P. y Bianchi, J., 2016. Cosa e' Mandinga ¿Será que crece lo mismo y se inunda más? Un apunte crítico sobre inundaciones urbanas pampeanas y crecidas ribereñas. 3° Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos. Ezeiza, Argentina.

González, N., y Hernández, M. A., 1997. La contaminación de aguas subterráneas por nitratos en áreas periurbanas.

González, S., Calvo, A. y Natenzon, C. E., 2016. Fundamentación conceptual y metodológica para la elaboración del Índice de Vulnerabilidad Social frente a Desastres – IVSD del PIRNA. Proyecto UBACYT – PDTs – PF01, 2013 – 2015. Instituto de Geografía. Facultad de Filosofía y Letras. Universidad de Buenos Aires, Argentina.

González, V. C., y Sandoval, I. S., 2012. Contaminación ambiental del aire en Buenos Aires, Argentina. *Revista Interamericana de Ambiente y Turismo-RIAT*, 8(1), 34-41.

Hammond, M. J., Chen, A. S., Djordjević, S., Butler, D., y Mark, O., 2015. Urban flood impact assessment: A state-of-the-art review. *Urban Water Journal*, 12(1), 14-29.

Hawley, R. J., y Bledsoe, B. P., 2011. How do flow peaks and durations change in suburbanizing semi-arid watersheds? A southern California case study. *Journal of Hydrology*, 405(1-2), 69-82.

Haylock M.R., Peterson T., Abreu de Sousa J.R., Alves L.M., Ambrizzi T., Anunciação Y.M.T., Baez J., Barbosa de Brito J.I., Barros V.R., Berlato M.A., Bidegain M., Coronel G., Corradi V., Garcia V.J., Grimm A.M., Jaildo dos Anjos R., Karoly D., Marengo J.A., Marino M.B., Meira P.R., Miranda G.C., Molion L., Moncunill D.F., Nechet D., Ontaneda G., Quintana J., Ramirez E., Rebello E., Rusticucci M., Santos J.L., Trebejo I. y Vincent L., 2006. Trends in total and extreme South American temperature 1960–2000 and links with sea surface temperature. *J Clim* 19:1490–1512

Hoffmann, J.A., Núñez S. y Gómez, A., 1987. Fluctuaciones de la precipitación en la Argentina, en lo que va del siglo. Actas del II Congreso Interamericano de Meteorología. V Congreso Argentino de Meteorología, Buenos Aires, Argentina, 12.1.1-12.1.5

Hollis, G. E., 1975. The effect of urbanization on floods of different recurrence interval. *Water Resources Research*, 11(3), 431-435.

Huang, H.J., Cheng, S.J., Wen, J.C. y Lee, J.H., 2008. Effect of growing watershed imperviousness on hydrograph parameters and peak discharge. *Hydrological Processes: An International Journal*, 22 (2008), pp. 2075-2085.

Huong, H.T.L. y Pathirana, A., 2013. Urbanization and climate change impacts on future urban flooding in Can Tho city, Vietnam. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, pp. 379–394.

Hurtado, M., Rosales, W. y Forte, L., 2008. Pérdida de suelos como pérdida de capital natural. IV Congreso Iberoamericano de Medio Ambiente y Calidad de Vida. En: El reto del desarrollo sostenible. Estrategias y Acciones. Diálogos y Propuestas. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Catamarca, Catamarca, Argentina.

INDEC, 2010. Censo de Población, Hogares y Viviendas 2010. Instituto Nacional de Estadística y Censos. <http://www.indec.gob.ar/> (01/09/2018).

INDEC, 2013. Estimaciones y proyecciones de población 2010-2040: total del país. 1º Ed. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Instituto Nacional de Estadística y Censos.

IGN, 2019. Capas SIG. Instituto Geográfico Nacional. <http://www.ign.gob.ar/> (19/04/2019).

IPCC, 2013. Glosario [Planton, S. (ed.)]. En: Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.

Jacobson, C. R., 2011. Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: a review. *Journal Environmental Management*, 92 (2011), pp. 1438-1448.

Jha, A., Bloch, R. y Lamond, J., 2012. Ciudades e Inundaciones. Guía para la Gestión Integrada del Riesgo de Inundaciones en Ciudades en el Siglo 21. Washington: International Bank for Reconstruction and Development y The World Bank.

- Kazimierski, L., Lecertua, E., Re, M., Storto, L., Badano, N. y García, P.E., 2015. Inundaciones en las cuencas de los Arroyos Sarandí y Santo Domingo. Informe INA - LHA 02-335-15. Ezeiza, Argentina.
- Kirby, P., 2006. «Teorizing globalization's social impact: proposing the concept of vulnerability». En: Review of International Political Economy vol. 13, nº 4.
- Koblinsky, C.J., Clarke, R.T., Brenner, A.C. y Frey, H., 1993. Measurement of river level with satellite altimetry. *Water Resour. Res.* 1993, 29, 1839–1848.
- Korte, G., 2001. *"The GIS Book (5th Ed. Rev.)"* Autodesk Press.
- Krause, P., Boyle, D. P., y Båse F., 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. European Geosciences Union.
- Krepper C.M., Scian B.V. y Pierini J.O., 1989. Time and space variability of rainfall in central-east Argentina. *Journal of Climate* 2: 39 – 47.
- Lattes, A., 2001. Población urbana y urbanización en América Latina. *La ciudad construida*, 49.
- Leandro, J., Chen, A.S., Djordjević, S. y Savić, D.A., 2009. Comparison of 1D/1D and 1D/2D coupled sewer/surface hydraulic models for urban flood simulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135 (6).
- Lecertua, E. A., 2010. Análisis de riesgo de duración de inundaciones en las áreas costeras del Río de la Plata considerando Cambio Climático. Tesis de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires. Argentina.
- Lecertua, E.A., Kazimierski, L.D, Re, M., Badano, N.D, Storto L.G. y Menéndez A., 2015. "Estudio de Inundaciones Urbanas por Precipitaciones Extremas en la Cuenca Sarandí – Santo Domingo". XXV Congreso Nacional del Agua, Paraná, Argentina.
- Liang, Q. y Smith, L.S., 2015. A high-performance integrated hydrodynamic modelling system for urban flood simulations. *Journal of Hydroinformatics*, 17 (4) 518-533; DOI: 10.2166/hydro.2015.029
- Liebmann, B., Vera C. S., Carvalho L. M. V., Camilloni, I., Hoerling, M.P., Barros, V.R., Báez, J. y Bidegain, M., 2004. An observed trend in central South American Precipitation. *Journal of Climate*, 17, 4357-4367.
- Nadale, C.A., 2014. Mapa de Lluvias del Ámbito Metropolitano de Buenos Aires Años 2012-2013. 2º Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos –IFRH 2014-. Buenos Aires, Argentina.
- Natenzon, C.E y Ríos, D. (Eds), 2015. Riesgos, catástrofes y vulnerabilidades. Aportes desde la geografía y otras ciencias sociales para casos argentinos. Buenos Aires, Argentina: Editorial Imago Mundi
- Mark, O., Weesakul, S., Apirumanekul, C., Boonya Aroonnet, S., Djordjevic, S. (2004) Potential and limitations of 1D modelling of urban flooding. *Journal of Hydrology*, 299 (3–4), 284-299.
- Massonnet, D., 1997. Satellite radar interferometry. *Scientific American*, 276(2), 46-53.
- Merz, B., Thielen, A. H. y Gocht, M., 2007. Flood risk mapping at the local scale: concepts and challenges. *Flood risk management in Europe*, 231-251.

Messner, F., Green, C., Meyer, V., Tunstall, S., y van der Veen, A., 2007. Evaluating flood damages: guidance and recommendations on principles and methods. Wallingford, UK: FLOODSite Consortium.

Miller, C.R. y Viessman, W., 1972. Runoff Volumes from Small Urban Watersheds. *Water Resources Research*, Vol. 8, No. 2, April 1972, pp. 429-434.

MINCyT, 2015. Protocolo interinstitucional de gestión de información. Inundaciones urbanas repentinas. Buenos Aires, Argentina.

Minetti, J. L. y Vargas W. M., 1997. Trends and jumps in the annual precipitation in South America, south of the 15°S, *Atmósfera*, 11, 205- 221.

Minetti, J. L., Vargas, W. M., Poblete, A. G., Acuna, L. R. y Casagrande, G., 2003. Non-linear trends and low frequency oscillations in annual precipitation over Argentina and Chile, 1931-1999. *Atmósfera*, 16, 119-135.

Morad, M. y Pérez, A.T., 2001. Sistemas de Información Geográfica y modelizaciones hidrológicas: Una aproximación a las ventajas y dificultades de su aplicación. *Boletín de la AGE*, (31), 23-46.

Morello, J., 2000. Manejo de Agrosistemas Periurbanos. M10. Maestría GADU, FAUD-UNMDP, Mar del Plata.

Municipalidad de Almirante Brown, FADU – UBA y Fundación Metropolitana, 2010. Diagnóstico Urbano de Almirante Brown. Programa de Fortalecimiento Institucional para el Municipio de Almirante Brown. Buenos Aires, Argentina.

National Weather Service, 2019. Flash Flood Warning. National Weather Service, National Oceanic and Atmospheric Administration, USA. Recuperado de <https://www.weather.gov>.

Olaya, V., 2012. *Sistemas de Información Geográfica*. España. Ed. CreateSpace Independent Publishing Platform (Amazon).

Ollero Ojeda, A., 1997. Crecidas e inundaciones como riesgo hidrológico. Un planteamiento didáctico. *Lurralde*, (20), 261-283.

Paoli, C., Dondeynaz, C., y Carmona-Moreno, C., 2015. Gestión integrada de crecidas: guía y caso de estudio. Informe Técnico de la Comisión Europea. Recuperado de <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC97744/manual%20gic-2015online.pdf>.

Penalba, O. C. y W. M. Vargas., 2004. Interdecadal and Interannual variations of annual and extreme precipitation over central-northeastern Argentina. *Int. J. Climatology*, 24, 12, 1565-1580.

Penalba, O. C., y Robledo, F. A., 2010. Spatial and temporal variability of the frequency of extreme daily rainfall regime in the La Plata Basin during the 20th century. *Climatic Change*, 98(3-4), 531-550.

Penning Rowsell E., Fordham M., Correia F.N., Gardiner J., Green C., Hubert G., Ketteridge A.M., Klaus J., Parker D., Peerbolte B., Pflügner W., Reitano B., Rocha J., Sanchez-Arcilla A., Saraiva M.G., Schmidtke R., Torterotot J.P., Van der Veen, A., Wierstra, E. y Wind H., 1994. Flood hazard assessment, modelling and management: results from the EUROflood project. In:

Penning-Rowsell E, Fordham M (eds) Floods across Europe: flood hazard assessment, modelling and management, Middlesex University Press, London, pp37–72.

Pereyra, F. X., 2004. Geología urbana del área metropolitana bonaerense y su influencia en la problemática ambiental. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 59(3), 394-410.

Pittock A. B. 1980: Patterns of climatic variation in Argentina and Chile I. Precipitation. 1931-60. *Mon. Weath. Rev.*, 108, 1347-1360.

Rashmi, S., Addamani, S., Venkat, S. y Ravikiran, S., 2014. Spectral angle mapper algorithm for remote sensing image classification. *IJISSET–International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 50(4), 201-205.

Re, M., y Barros, V. R. 2009. Extreme rainfalls in se South America. *Climatic Change*, 96(1-2), 119-136.

Re, M., Storto, L., Lecertua, E.A y Kazimierski, L.D., 2015. Inundaciones en La Ribera de Quilmes: Mapas de nivel y duración de inundaciones. *Anticipando la Crecida. Informe INA–LHA 01–354–15. Ezeiza, Argentina.*

Re, M., Kazimierski, L. D. y Badano N. D., 2019. High-resolution urban flood model for risk mitigation validated with records collected by the affected community. *Journal of Flood Risk Management*. DOI: 10.1111/jfr3.12524

Robledo, F. A., y Penalba, O. C., 2008. Análisis estacional de la frecuencia diaria y la intensidad de los extremos de precipitación sobre el sudeste de Sudamérica. *Meteorologica*, 32(1-2), 31-49.

Roca, M. y Davison, M., 2010. Two dimensional model analysis flash-flood processes: application to the Boscastle event. *Journal of Risk Flood Management*, 3 (1), 63–71.

Romanazzi, P., 2011. Caracterización y tratamiento de la inundación urbana: el caso de la cuenca del arroyo del Gato en el partido de La Plata. Trabajo publicado en el informe final *Evaluación de la Infraestructura Social Básica de la Provincia de Buenos Aires*. Universidad Nacional de La Plata.

Romero, F. S., 2016. La Teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental. *Revista AquaTIC*, (24).

Rusticucci, M.M. y Penalba, O.C., 2000. Interdecadal changes in precipitation seasonal cycle over South America. Relationship with surface temperature. *Climate Research*, 16, N 1, 1-15.

Salvia A., 2011. La situación social en la región metropolitana de Buenos Aires: deudas sociales del Bicentenario 2010: una etapa de esperanza y oportunidades para superar la pobreza. Buenos Aires: Educa.

Sarria, F. A., Cutillas, P. P., y Castillo, F. G. C., 2004. Análisis del riesgo de inundación en zonas afectadas por avenidas de cuencas hidrográficas en régimen natural en la Región de Murcia. En *Medio ambiente, recursos y riesgos naturales: análisis mediante tecnología SIG y teledetección* (pp. 219-232). Servicio de Publicaciones, España.

Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica, 2019. Sistema Nacional de Información Hídrica. Ministerio del Interior, Obras Públicas y Viviendas. Argentina.

- Seppi, S., 2018. *Sistemas de Información Geográfica e Infraestructura de Datos Espaciales*. Curso en línea – Módulo II. Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich. Comisión Nacional de Actividades Espaciales – Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Shaw, E.M., 2005. *Hydrology in Practice*. Formerly of the Department of Civil Engineering Imperial College of Science, Technology and Medicine, UK.
- Silveira, L., López, G., Chreties, C. y Crisci, M., 2012. Steps towards an early warning model for flood forecasting in Durazno city in Uruguay. *Journal of Risk Flood Management*, 5 (3), 270–280.
- Simmons, D. L., y Reynolds, R. J., 1982. Effects of urbanization on base flow of selected south-shore streams, long island, New York. *Journal of the American Water Resources Association*, 18(5), 797-805.
- Smith, L.C., Isacks, B.L., Bloom, A.L. y Murray, A.B., 1996. Estimation of discharge from three braided rivers using synthetic aperture radar satellite imagery. *Water Resour. Res.* 1996, 32, 2021–2034.
- SMN, 2013. Características meteorológicas del evento de precipitaciones intensas ocurridas el 2 de Abril de 2013. Informe del 25 de Abril de 2013. Servicio Meteorológico Nacional. Buenos Aires, Argentina.
- Stenta, H. R., Riccardi, G. A., Basile, P. A., 2016. Simulación hidrológica-hidráulica en pequeñas cuencas del sur santafesino. Caso de estudio: cuencas del Arroyo Seco y del Arroyo Frías.
- Suárez, A. L., 2011. Segregación residencial en la región metropolitana de Buenos Aires [en línea]. En Balian de Tagtachian, B., Suárez, A. L. (comps.). *Pobreza y solidaridad social en la Argentina: aportes desde el enfoque de las capacidades humanas*. Buenos Aires: Educa. Disponible en: <http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/repositorio/investigacion/segregacion-residencial-buenos-aires-suarez.pdf> [Fecha de consulta: 06/09/2017]
- Tholin, A.L. y Keifer, C.J., 1960. Hydrology of Urban Runoff. *Transactions ASCE*, Paper No. 3061, Vol. 125, pp. 1308-1355.
- Tucci, C. E., 2007. Urban flood management. *WMO and Capnet*.
- UNISDR, 2009. Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas. Terminología sobre Reducción de Riesgo de Desastres. Naciones Unidas. Ginebra, Suiza. p, 28.
- UNISDR, 2015. Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030.
- UNLP, 2013. Estudio sobre la Inundación ocurrida los días 2 y 3 de abril de 2013 en las ciudades de La Plata, Ensenada y Berisso. Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ingeniería, Departamento de Hidráulica.
- Urban Drainage and Flood Control District (UDFCD), 2007. *Drainage Criteria Manual*, Chapter 5 – Runoff. Urban Drainage and Flood Control District, Denver, CO.
- van Dijk, E., van der Meulen, J., Kluck, J. y Straatman, J.H.M., 2014. Comparing modelling techniques for analysing urban pluvial flooding. *Water Science & Technology*, 69 (2), 305-311.

- Vallejos, V. H. y Pohl Schnake, V., 2007. La gestión integral de residuos sólidos urbanos en la Provincia de Buenos Aires. In *IX Jornadas de Investigación del Centro de Investigaciones Geográficas y del Departamento de Geografía*. Universidad Nacional de La Plata.
- Vargas, W., 1987: El clima y sus impactos. Implicancias en las inundaciones del noroeste de Buenos Aires. Boletín Informativo Techint N 250.
- Velasco, M., Cabello, A. y Russo, B., 2016. Flood damage assessment in urban areas. Application to the Raval district of Barcelona using synthetic depth damage curves. *Urban Water Journal*, 13 (4), 426-440.
- Viessman, W. y Lewis, G., 2003. *Introduction to Hydrology*. Prentice Hall, Chapter 3, 5 ed, New York.
- Wind H.G., Nierop T.M., de Blois C.J y de Kok J.L., 1999. Analysis of flood damages from the 1993 and 1995 Meuse flood. *Water Resources Research* 35(11):3459–3465.
- Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T. y Davis, I., 2003. *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters*. 2nd Edition. London: Routledge.
- Yen, B.C., 2001. *Hydraulics of Sewer Systems*. Stormwater Collection Systems Design Handbook, Chapter 6. L.M. Mays, ed., McGraw-Hill, New York.
- Yu, H., Huang, G. y Wu, C., 2014. Application of the stormwater management model to a piedmont city: a case study of Jinan City, China. *Water Science & Technology*, 70 (5), 858–864.
- Zwiers, F. W., Alexander, L. V., Hegerl, G. C., Knutson, T. R., Naveau, P., Nicholls, N., y Wang, X. L., 2011. Challenges in estimating and understanding recent changes in the frequency and intensity of extreme climate and weather events. Community paper on climate extremes. In *Proceedings of World Climate Research Programme Open Science Conference, Denver, CO, WCRP*.