



## Análisis de riesgo de inundación mediante modelación de escurrimiento en zona urbana de la ciudad de Oberá, Misiones

### Flood risk analysis by runoff modeling in urban area of Oberá (Misiones) city

Rodriguez, Tomás <sup>1</sup> ✉ - Riccardi, Gerardo <sup>2,3</sup> - Ruberto, Alejandro <sup>4</sup>

Recibido: 16 de diciembre de 2014 • Aceptado: 29 de diciembre de 2014

#### Resumen

*Las ciudades de la zona centro de Misiones presentan un gran número de áreas verdes dentro de las zonas urbanas. Las características topográficas, de cobertura vegetal y textura de los suelos que poseen han contribuido a reducir los inconvenientes por inundación. Sin embargo, dichas ciudades comienzan a evidenciar el aumento de niveles hidrométricos y velocidades máximas en las calles, debido al avance de la urbanización sobre dichas áreas verdes. A los efectos de determinar el riesgo de inundación en calles para distintas recurrencias en un escenario actual de la cuenca en la ciudad de Oberá se ha constituido, calibrado y actualmente se explota un modelo hidrológico-hidráulico de la cuenca del arroyo Mbotaby, la cual posee 976 ha de área de aporte y 24 % de impermeabilidad. Se persigue como objetivo valorar dicho riesgo por inundación ante un posible escenario futuro, donde se alcancen los máximos valores de impermeabilidad impuestos por el actual Código de Edificación Municipal dentro del área de captación de la cuenca en estudio. Como resultado se obtuvieron mapas de niveles hidrométricos y velocidades máximas para 2, 5 y 100 años de recurrencia para un posible escenario futuro, donde se asume alcanzar un 45 % de superficies impermeables. Los escenarios futuros indican un leve aumento del caudal máximo en el punto de control de la cuenca y un significativo aumento, tanto del volumen total erogado por la cuenca, como de los niveles máximos en las distintas calles respecto al escenario actual.*

1. Becario Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Juan Manuel de Rosas 325, (3360) Oberá, Misiones, Argentina.

✉ rodriguezdt@fio.unam.edu.ar

2. Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales (CURIHAM), Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario (UNR), Riobamba 245 bis, (2000) Rosario, Argentina.

3. Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario.

4. Grupo de Investigación del Departamento de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste (UNNE), Las Heras 727, (3500) Resistencia, Chaco.

**Palabras clave:** cuencas urbanas; precipitaciones intensas; altas pendientes; modelación hidrológica-hidráulica; mapas de inundación.

## Abstract

Cities located in the central region of the Misiones province (Argentina) still display a significant amount of green spaces within their urban areas. Topographical features, vegetation covers and soil textures of such green areas have always contributed to mitigate risks due to flooding. However, these cities are beginning to show increases in water levels and flow velocities over the streets during rainfall events. Such increases are yielded by the replacement of green areas with impervious areas (e.g. streets, buildings, parking lots). Particularly for the city of Oberá, a hydrological-hydraulic model of the Mbotaby Stream basin (with 976 ha of total contribution area and 24 % of impervious areas) has been calibrated, and is currently being exploited. The model has been used to determine the risk of flooding over the streets for a number of recurrences considering the current conditions of the basin. This work aims to assess the risk of flooding for a possible future scenario, setting the maximum values of impervious areas in accordance with the current Municipal Building Code. As a result, a number of maps for water levels and maximum flow velocities were obtained, with recurrences of 2, 5 and 100 years as possible future scenarios, in which a maximum of 45 % of impervious areas were assumed. Comparing to current conditions of the basin, future scenarios indicate a slight increase in maximum discharge at the control point of the basin, and a significant increase in both the total volume discharged by the basin and the maximum water levels over different streets.

**Keywords:** urban watersheds; intense rainfall events; high slope; hydrological-hydraulic modelling; inundation maps.

## INTRODUCCIÓN

La provincia de Misiones se encuentra situada en una región subtropical sin estación seca, exhibiendo algunos de las mayores precipitaciones anuales del país (Mezher et al., 2008). Según la calificación climática de Papadakis (1962) citado por Olinuk (1998) la zona de estudio corresponde a un régimen isohigro, donde las estaciones hídricas están poco definidas y en cualquier estación, o mes, pueden presentarse sequías o abundantes lluvias. Región azotada por tormentas intensas con grandes volúmenes de precipitación ocurrentes en cortos periodos de tiempo, generalmente asociadas a frentes fríos provenientes del Sudoeste (Litwin y Franco, 1987), como lo evidencian por ejemplo los eventos registrados en la ciudad de Oberá el día 1 de diciembre de 2012, donde 276 mm se precipitaron en tan solo 12 horas y el del 19 del mismo mes en la ciudad de Posadas, con 206 mm caídos en 6 h.

Geográficamente, Misiones está situada fuera de la gran llanura chaco-pampeana que domina la Mesopotamia. La meseta central de la provincia es un ramal de sistema orográfico Serra Geral, con descendencia geológica y orográfica de la región montañosa del Brasil meridional (Hausen, 1919). El territorio provincial es una meseta rocosa, cuyo relieve es considerado una transición entre la orografía brasileña y las planicies

argentinas. Hacia el Sur de la provincia el paisaje se torna paulatinamente llano y el terreno va descendiendo lentamente hasta volverse una zona de llanura.

Misiones presenta la característica de pertenecer a dos grandes sistemas de ríos, ya que la Sierra Central de Misiones es el parteaguas que divide las cuencas del Paraná y Uruguay. Dado los niveles del terreno y las profundidades de los suelos residuales, la erosión ha creado formas topográficas muy accidentadas donde los ríos y arroyos han cavado su cauce en el suelo, conformando lechos profundos.

La ciudad de Oberá se encuentra ubicada en la zona centro de la provincia de Misiones, en la intersección de las Rutas Nacional 14 y Provincial 103 a los 27°29' de latitud Sur y 55°08' de longitud Oeste (Figura 1). Dentro de los límites del municipio se determinó, mediante la utilización de un modelo digital de terreno (SRTM, 2009), que el 47 % de la superficie presenta pendientes topográficas mayores a 5 %, con valores máximos que superan el 20 %. Posee un módulo pluviométrico anual de 1.925 mm (CELO, 2013) y al tratarse de una ciudad joven, fundada en 1927, presenta grandes áreas verdes dentro del ejido urbano, con lotes residenciales y espacios públicos que conservan áreas permeables con pastos y árboles de mediana magnitud.

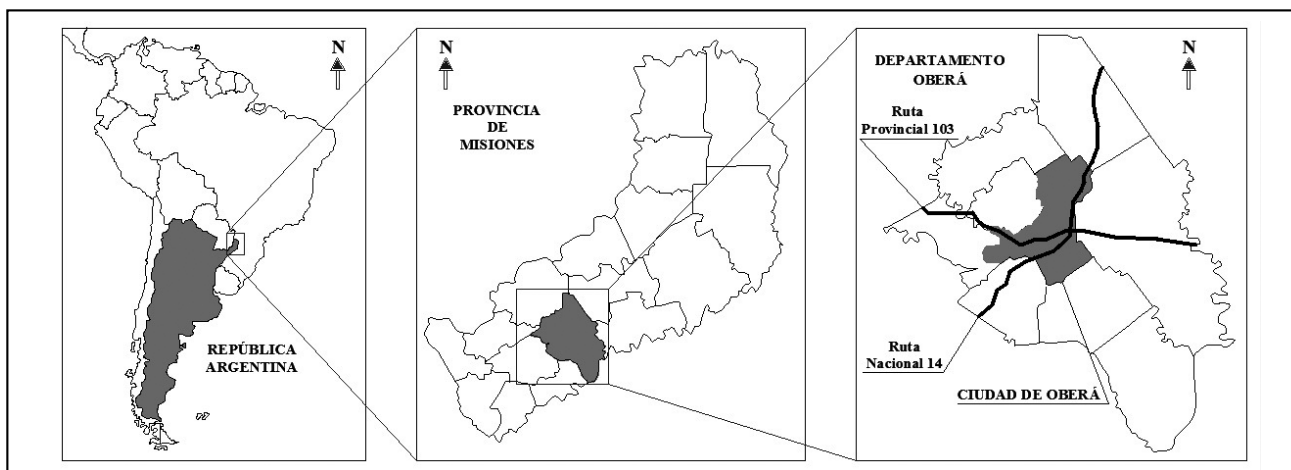


Figura 1. Ubicación geográfica de la ciudad de Oberá.

Sin embargo, la dinámica que plantean las urbanizaciones ha contribuido a incrementar las afectaciones como aumento del riesgo de inundación, decrecimiento de la calidad del agua superficial y subterránea e incremento de los procesos de erosión y sedimentación. El aumento de caudales máximos y volúmenes de escurrimiento directo, conjuntamente con la disminución del tiempo de concentración de las cuencas debido a la impermeabilización de los suelos y los cambios en su ocupación, han aumentado el riesgo por inundación dentro y fuera de la zona urbanas de las ciudades (Rodríguez et al., 2013a).

El 95 % de la zona urbanizada del municipio vierte sus aguas en subcuencas pertenecientes a la cuenca del río Paraná, mientras que el 5 % restante lo hace hacia el río Uruguay. Producto de investigaciones precedentes se cuenta en la ciudad de Oberá con un modelo hidrológico-hidráulico de una de las principales subcuencas del sistema de desagües pluviales, la cuenca del arroyo Mbotaby, la cual recibe 40 % de los excedentes hídricos superficiales urbanos de la ciudad. Mediante la utilización de registros de hietogramas de precipitación y los limnigramas generados en el punto de control de la cuenca se logró una aceptable calibración del mismo, desarrollándose así una herramienta capaz de describir la dinámica del escurrimiento superficial en una región urbana con gran cantidad de áreas verdes (24 % de impermeabilidad total) y elevadas pendientes topográficas (pendiente media de la cuenca 5.5 %).

El modelo implementado en el entorno del SWMM 5.0ve (GMMF, 2005), ha sido utilizado anteriormente para evaluar el actual riesgo por inundación en las calles dentro de la cuenca. Mapas de niveles y velocidades máximas en cunetas de calles fueron confeccionados con el fin de detectar las zonas más comprometidas por alcanzar niveles de desborde y velocidades capaces de arrastrar objetos.

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el riesgo por inundación en las calles de la cuenca Mbotaby ante un posible escenario futuro, donde se alcance el máximo de superficies construidas impuestos por el actual Código de Edificación Municipal (CEM) de la ciudad de Oberá. El trabajo se enmarca en estudios de doctorado orientados a la descripción de la dinámica del escurrimiento hídrico superficial en dicha región misionera y es continuación de una sucesión de diferentes artículos

anteriores (Rodríguez y Riccardi, 2014a; Rodríguez y Riccardi, 2014b; Rodríguez et al., 2014).

Para la evaluación del riesgo de inundación se confeccionaron mapas de niveles y velocidades máximas desarrollados para una tormenta de duración crítica de 12 horas, con hietogramas determinados por el método de los bloques alternos, para 2, 5 y 100 años de recurrencias. De la comparación de mapas de riesgo del escenario actual y futuro posible surge el análisis del impacto hidrológico esperable debido a la dinámica de la urbanización en caso de mantenerse el actual código de edificación.

## LA CUENCA DEL ARROYO MBOTABY

### Área de aporte

La cuenca en estudio comprende el área de aporte del arroyo Mbotaby. El brazo más largo de este arroyo nace al Este de la ciudad, en la divisoria de aguas de las cuencas del río Paraná y Uruguay como se observa en la Figura 2.

El arroyo Mbotaby recibe, aproximadamente, 40 % de los excedentes hídricos superficiales del casco urbano de la ciudad de Oberá. Recorre el ejido urbano hacia el Oeste hasta, finalmente unirse al arroyo Tuichá para formar el arroyo Yabebiry, el cual desemboca en el río Paraná. Hasta el punto de control definido, la cuenca posee 976,41 ha de superficie.

### Ocupación y usos del suelo actual

Para la clasificación de los usos del suelo se utilizaron simultáneamente cuatro procedimientos: revisión de la carta orgánica de la ciudad, evaluación por imagen satelital, comparación con investigaciones precedentes (Rodríguez et al., 2013b) y relevamiento in-situ de puntos particulares.

En base a los procedimientos citados se llevó a cabo la zonificación de la ocupación y usos del suelo, caracterizando cada clase mediante el conocido número de curva o CN (US-SCS, 1975). Los valores determinados de CN en condición II se presentan en la Tabla 1. El valor de cada zona corresponde únicamente al área permeable de las mismas, en condiciones medias de humedad.

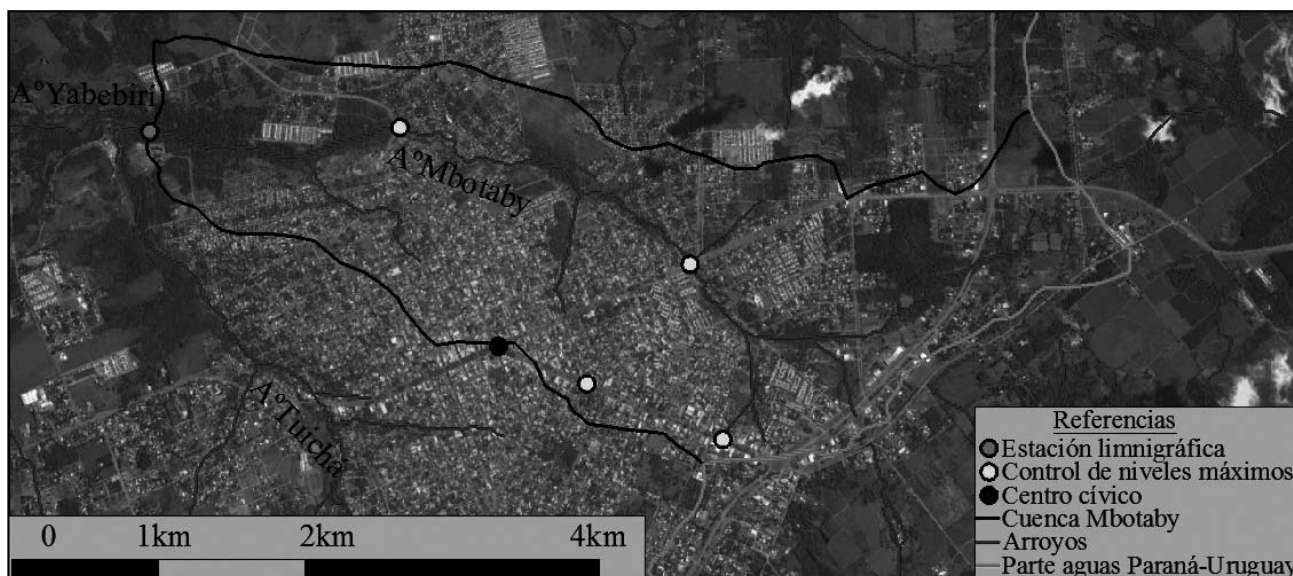


Figura 2. Cuenca del arroyo Mbotaby, adaptado de Google Earth® (2013).

Puede alegarse que al año 2010 el grado de impermeabilización de la cuenca se valorizaba en 24 % y al año 2013 el 60 % de las calles de la cuenca Mbotaby cuentan con cordón cuneta de hormigón, con calles materializadas en pavimento flexible o empedrado tipo brasilero. El restante de las calzadas son de tierra y las cunetas son excavadas en el mismo suelo.

### Escenario futuro hipotético

Para establecer un posible escenario futuro, donde la presión urbanística avance sobre los actuales espacios permeables dentro de la cuenca, se estableció en los lotes particulares una superficie impermeable igual al máximo de superficie construida permitido por el CEM vigente, según las distintas zonificaciones.

Es de hacer notar que el CEM no limita las superficies impermeables que puede haber dentro de los lotes, sino que impone restricciones a las superficies cubiertas mediante el Factor de Ocupación del Suelo (FOS). Según este código el FOS está determinado por la suma de superficies cubierta; las cuales son consideradas como aquella que posee cubierta de techo y cerramientos verticales en al menos tres direcciones, mientras que si posee cerramiento en dos o menos direcciones es una superficie semicubierta y su incidencia en el FOS será multiplicado por 0,5. Por lo que es esperable que las superficies impermeables totales sean superiores al FOS establecido como máximo en el código, tanto por las superficies semicubiertas, como por los pisos impermeables que no poseen limitación.

Asimismo, dada la manera en que está constituido el modelo hidrológico, es necesario contemplar en cada subcuenca el porcentaje de impermeabilización que corresponde a la media calle, es decir a su media calzada y vereda correspondientes. Si consideramos a las calzadas como impermeables en un 98 % y a las veredas impermeabilizadas en un porcentaje igual al FOS, según la zonificación en la que se encuentre, en promedio tenemos un incremento del 5 % en la impermeabilidad de las subcuencas.

Para este posible escenario futuro las superficies impermeables de las zonas del distrito central, residenciales, nuevos loteos e industrias fueron supuestas igual a los FOS máximos más un 5 % debido a la incidencia de las calles, las actuales rutas de tierra consideradas como asfaltadas con 45 % de impermeabilidad y las actuales rutas asfaltadas, parques y reservas ecológicas conservan su actuales porcentajes de impermeabilidad. Para este escenario la totalidad de las superficies impermeables fueron consideradas como directamente conectadas y el CN de las superficies permeables son iguales a las condiciones actuales salvo para los actuales caminos de tierra (Tabla 1).

En este posible escenario futuro se consideraron que las actuales calzadas de tierra alcanzaron a ser materializadas en pavimento tipo empedrado brasilero, con cordones cunetas de hormigón y las actuales calzadas de pavimento brasilero recibieron un tratamiento superficial bituminoso, comportándose como calzadas de pavimento flexible.

### CONSTITUCIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO-HIDRÁULICO

#### Implementación del SWMM

La modelación hidrológica-hidráulica, para reproducir la dinámica de los procesos de generación y propagación de escurrimiento superficial, se llevó a cabo con la versión 5.0vE del software SWMM (Storm Water Management Model), desarrollada por la National Risk Management Research Laboratory de Estados Unidos, traducida al español por Grupo Multidisciplinar de Modelación de Flujo de la Universidad Politécnica de Valencia y de uso gratuito (*GMMF, 2005*).

Este software, básicamente, está constituido por un módulo hidrológico que permite llevar a cabo la transformación lluvia-caudal y un módulo hidrodinámico que permite propagar las crecidas generadas por los distintos elementos constitutivos de los sistemas de drenajes pluviales urbanos.

Tabla 1. Zonificación, área impermeable y CN adoptados para el escenario actual y el posible escenario futuro.

Zonificación	Escenario actual			Escenario futuro		
	% sup. imp.	% sup. imp. DC	CN II	% sup. imp.	% sup. imp. DC	CN II
Distrito central	85	90	74	85	100	74
Residencial de densidad alta	65	70	74	75	100	74
Residencial de densidad media	45	50	74	65	100	74
Residencial de densidad baja	25	30	74	55	100	74
Loteos nuevos y zonas de intrusión	5	10	74	50	100	74
Industrias	25	30	74	60	100	74
Parques y canchas	2,5	5	70	2,5	100	70
Reservas ecológicas	0	0	66	0	100	66
Rutas asfaltadas	45	50	74	45	100	74
Ruta de tierra	25	30	70	45	100	74

## Constitución y discretización de elementos componentes del sistema

Con la intención de constituir y poner en funcionamiento operativo un modelo detallado, que permita calcular los tirantes de agua y velocidades desarrolladas en cada esquina, cordón cuneta, conductos y arroyos dentro de la cuenca, se llevó a cabo la constitución topológica con, al menos, 4 nodos en cada bocacalle (Figura 3a). Se desarrolló este nivel de detalle para poder establecer tanto los caudales que circulan a cada lado de las calles, como así también los niveles de agua en cada una de las cuatro esquinas de las bocacalles.

En general, cada manzana está representada por una subcuenca tributaria que descarga en el nodo más alto de su perímetro. En los casos necesarios de ser representados por otra condición, se subdividieron las manzanas en dos o más subcuencas tributarias. Las pendientes de todas las subcuencas se unificaron en un valor de 5,5 %, la cual resulta como la pendiente promedio de la cuenca determinada a través del MDT.

Los nodos están conectados entre sí de diferentes formas. El conducto entre dos esquinas de una misma manzana está caracterizado por una media calle, con su respectiva vereda, cordón cuneta y media calzada; cada uno de estos con su rugosidad característica en función del material que lo compone y las obstrucciones esperables.

En las cuatro esquinas de cada bocacalle los excedentes superficiales pueden ser conducidos hacia otro nodo por un cordón cuneta, atravesar la calle, ya sea por un badén o por desborde hacia las otras esquinas de la bocacalle donde el umbral de desborde está determinado por el gálibo de la calle, o bien pueden ser conducidos hacia un conducto cerrado por vertido o mediante una boca de tormenta o sumidero.

Si bien el software permite evaluar el funcionamiento de los sumideros a través de diferentes coeficientes de descarga y características recomendadas por el mismo, cada boca de tormenta fue cargada con su respectiva curva de descarga utilizando ecuaciones desarrolladas en la bibliografía especializada, en función a sus verdaderas dimensiones y características (Riccardi, 2004).

## Áreas directa e indirectamente conectadas

En Oberá, dada las prestaciones hidráulicas de la topografía y el suelo con cobertura vegetal, muchas viviendas descargan el flujo de los pisos y techos a los patios con césped de las casas. Techos que, en gran número, no cuentan con canaletas, descargando directamente sobre los pisos y áreas verdes de los lotes. En función de este mecanismo interno de drenaje de los lotes, se estructuró cada unidad de aporte de la siguiente manera: (i) un determinado porcentaje del área impermeable total se consideró directamente conectado (AIDC) al sistema de desagües pluviales (Tabla 1), (ii) la superficie impermeable restante o no conectada (AINC) se consideró con descarga en las zonas permeables de los lotes y (iii) los excedentes de las zonas permeables (AP), una vez descontadas las pérdidas, son conducidos al sistema. La Figura 3b muestra un ejemplo donde el 50 % de la superficie impermeable esta directamente conectada.

El ambiente de modelación resultó de una extensión superficial de 976,41 ha, correspondiendo 24,5 % a áreas impermeables totales, de las cuales 12,9 % del total están directamente conectadas, y 75,5 % de áreas permeables.

En resumen, el modelo quedó constituido por 972 subcuencas tributarias, 2.967 nodos y 3.742 elementos conductores de los excedentes hídricos (calles, cunetas, sumideros, zanjas, canales, conductos y arroyos).

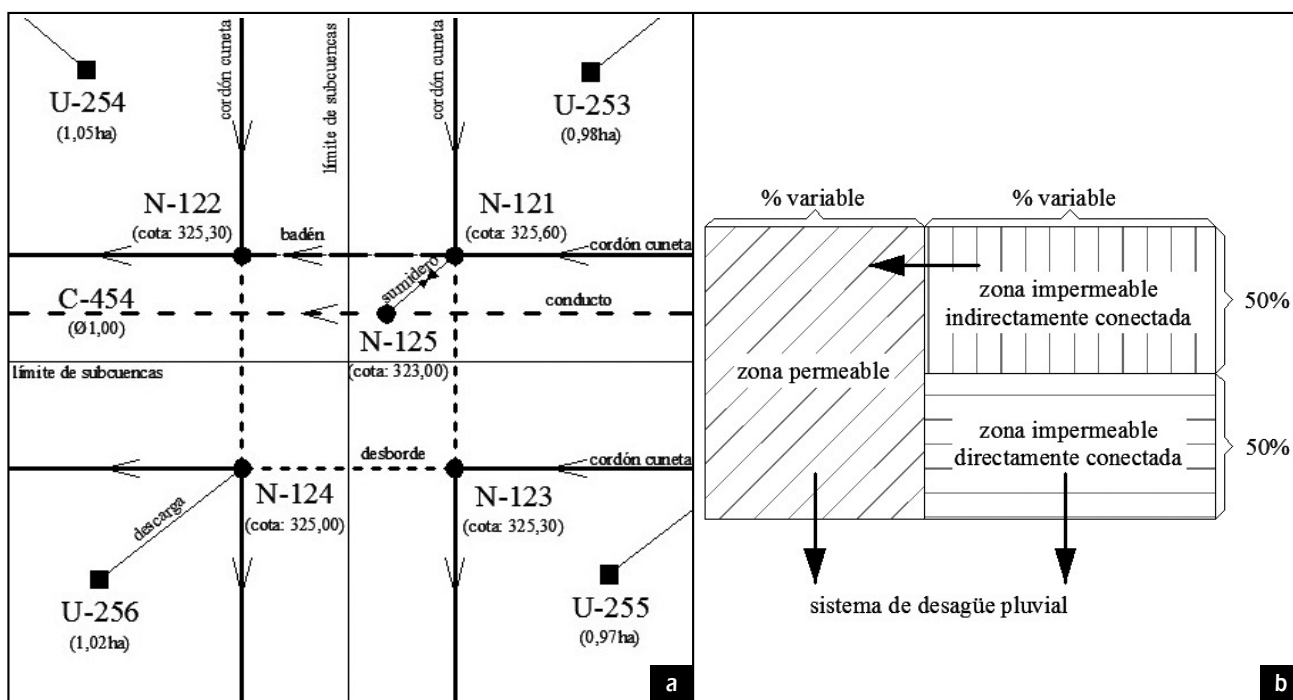


Figura 3. a: Esquema del modelo en bocacalle. b: Ejemplo de interacción entre las zonas permeables e impermeables.

## Bocas de tormenta y vertederos

Para la evaluación del flujo captado por las bocas de tormentas horizontales se utilizó el diagrama de gastos específicos en función del tirante de agua, desarrollado por *UDFCD (1984)* adaptado por *Riccardi (2004)* (Figura 4). Para las bocas de tormenta verticales se utilizaron las ecuaciones 1 y 2 presentadas por *Bertoni et al. (1995)* citado por *Riccardi (2004)*.

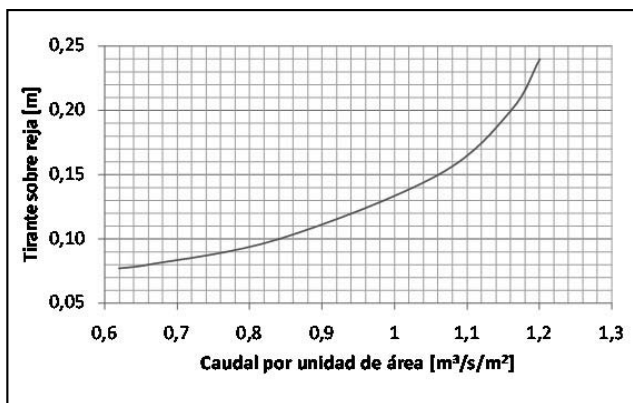


Figura 4. Capacidad específica de una boca de tormenta horizontal (UDFCD, 1984; adaptado por Riccardi, 2004).

$$Q = 1,656L \cdot y_0^{1,5} \rightarrow y_0 \leq 1,5h \quad (1)$$

$$Q = 0,67L \cdot h \left[ 2g \left( y_0 - \frac{h}{2} \right) \right] \rightarrow y_0 > 1,5h \quad (2)$$

Con:  $Q$  caudal [ $m^3/s$ ],  $L$  longitud [ $m$ ],  $y_0$  tirante de agua [ $m$ ] y  $h$  abertura [ $m$ ] de la boca de tormenta.

En tanto que para las bocas de tormenta combinadas con aberturas verticales y horizontales, los valores teóricos fueron afectados por un coeficiente de reducción de 65 % (*UDFCD, 1984*; citado por *Riccardi, 2004*).

Los vertederos detectados en el sistema, fueron incorporados en el modelo como canales de hormigón de 0,15 m de longitud (espesor del cordón cuneta), con sus respectivos desniveles de entrada y salida. Se decidió confeccionarlos de esta manera debido a que se comportaban correctamente durante el flujo normal, desde las calles hacia los cursos de agua, y durante el desbordamiento de los arroyos, donde el flujo se produce desde estos hacia las cunetas de calles.

## Calibración del modelo

Para la calibración del modelo se utilizaron los registros de cuatro eventos pluviográficos. Los parámetros a calibrar fueron los coeficientes de resistencia empleados en las distintas superficies y elementos de conducción, como así también se verificó el número de curva para la determinación del escurrimiento neto.

Los datos de precipitación fueron obtenidos por la estación meteorológica instalada en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Misiones (*FIO, 2013*), situada cercana al baricentro de la cuenca en estudio. Dicha estación cuenta con un pluviógrafo digital a canchales, con una resolución en intervalos de hasta 1 minuto y 0,2 mm. Para la determinación del caudal erogado registrado se utilizó el limnigrama registrado y una relación H-Q determinada previamente en el punto de control de la cuenca (Figura 2). Los niveles se obtuvieron por observación directa de las reglas limnimétricas instalada en el punto de control de la cuenca, obteniéndose lecturas cada 5 minutos. La condición de humedad antecedente en todos los eventos evaluados en la calibración fue considerada como media, empleándose el CN medio (Tabla 1).

Seguidamente, en la Tabla 2, se exhiben los coeficientes de rugosidad resultantes de la calibración para las distintas superficies de escurrimiento.

A partir de los resultados de los eventos pluviográficos modelados en la calibración se logró una aceptable reproducción de los niveles de agua en la sección de control de la cuenca y otros cuatro puntos característicos del interior de la misma (Figura 2), donde fueron contrastados niveles máximos observados, arrojando valores aceptables con una diferencia inferior al 15 %.

Tabla 2. Coeficiente de Manning utilizados en las distintas superficies de escurrimiento.

Coeficientes de Manning utilizados [adm]					
Subcuencas	Áreas permeable	0,100	Calles de tierra	Calzada	0,040
	Áreas impermeable	0,018		Cuneta	0,030
Calles de pavimento flexible	Calzada	0,020		Conductos de hormigón	Veredas
	Cuneta	0,018	0,015		
	Veredas	0,025	Zanjas de tierra	Lecho	0,030
Calles de empedrado tipo brasilero	Calzada	0,025		Arroyos	Valle
	Cuneta	0,018	Lecho		0,035
	Veredas	0,025	Valle		0,075

## ELABORACIÓN DE MAPAS DE NIVELES Y VELOCIDADES MÁXIMAS MEDIANTE MODELACIÓN MATEMÁTICA HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA

Una vez calibrado el modelo de simulación, se procedió a su explotación enfocada a la elaboración de mapas de velocidades y niveles máximos alcanzados en las calles de todo el ambiente en estudio para tormentas de 2, 5 y 100 años de recurrencia.

### Tormenta crítica

Primeramente se determinó la duración de la tormenta crítica. Para este tipo de análisis la tormenta crítica se define como aquella que genera caudales máximos lo suficientemente cercanos al máximo invariante y poseen una duración esperable en la región de estudio. Se seleccionaron dos elementos críticos del sistema para ser evaluados, la salida propiamente dicha de la cuenca Mbotaby y el tramo más comprometido de la calle Salta, donde suelen presentarse inundaciones menores pero las aguas superficiales alcanzan altas velocidades. Se decidió así trabajar con tormentas críticas de 12 h de duración, ya que las mismas producen caudales y tirantes cercanos a los máximos esperables (variación del orden del 2 %) y una duración mayor de la tormenta agregaría un tiempo de cálculo innecesario a la modelación y no aportará una apreciable precisión al cálculo.

Con la duración de la tormenta establecida se confeccionaron tres hietogramas para 2, 5 y 100 años de recurrencia, utilizando el método de los bloques alternos (Riccardi, 2004) y las curvas I-D-R de la localidad de Cerro Azul (Litwin y Franco, 1987) distante 36 km de la ciudad de Oberá.

Para 2 años de recurrencia son esperables 99,9 mm de precipitación total, con una intensidad media de 8,3 mm/h y

una intensidad máxima durante 5 minutos de 91 mm/h. Para 5 años de recurrencia, el total precipitado esperable es de 125,8 mm, con una intensidad media de 10,5 mm/h y una intensidad máxima de 101,8 mm/h. En tanto que para 100 de recurrencia, obtenemos 201,2 mm totales precipitados, con una intensidad media de 16,8 mm/h y 140,7 mm/h durante los 5 minutos de mayor intensidad.

Posteriormente se llevaron a cabo las respectivas corridas del modelo de simulación para determinar los niveles y velocidades en cada uno de los elementos del desagüe pluvial en los que se constituyó el modelo.

### Resultados obtenidos

Todas las corridas arrojaron errores de continuidad hidrológica e hidráulica menores al 1 %. El modelo permitió generar valores de tirante de agua, velocidad y caudal en todos los elementos del sistema de drenaje pluvial constituido. El paso de tiempo de cálculo que ha permitido verificar el menor error en continuidad fue de un segundo.

Para un adecuado seguimiento de los resultados obtenidos, una vez culminadas las simulaciones, los valores de tirantes, velocidades y caudales fueron impresos en archivos cada 1 min. Considerando los 2.967 nodos y 3.742 elementos con que se constituyó el ambiente modelado, el tiempo de cálculo aproximado de cada tormenta fue de 26 min. En la Tabla 3 se presenta un resumen con los resultados de las corridas con datos del balance hidrológico, valores de caudales y niveles máximos en el punto de control de la cuenca, como así también el tiempo que permanece desbordado el arroyo en dicho punto, teniendo presente que el mismo se produce para un nivel de agua de 1,80 m.

Tabla 3. Síntesis de resultados obtenidos para los dos escenarios y distintas recurrencias.

Recurrencia	Parámetro	Unidades	Escenario actual	Escenario futuro	Variación
2 años	Caudal máximo	[l/s]	69,057	72,679	5,2 %
	Nivel máximo	[m]	2,48	2,51	1,2 %
	Tiempo al pico	[h:mm]	6:45	6:50	0:05
	Tiempo de desborde	[h:mm]	1:40	1:50	0:10
	Precipitación total	[mm]	99,87	99,87	0,0 %
	Infiltración	[mm]	40,43	29,11	-28,0 %
	Precipitación en exceso	[mm]	54,45	68,85	26,4 %
	Almacenamiento	[mm]	5,05	1,95	-61,4 %
5 años	Caudal máximo	[l/s]	75,595	78,417	3,7 %
	Nivel máximo	[m]	2,54	2,57	1,2 %
	Tiempo al pico	[h:mm]	7:00	7:05	0:05
	Tiempo de desborde	[h:mm]	2:20	2:40	0:20
	Precipitación total	[mm]	125,8	125,8	0,0 %
	Infiltración	[mm]	44,58	32,18	-27,8 %
	Precipitación en exceso	[mm]	76,22	91,74	20,4 %
	Almacenamiento	[mm]	5,06	1,96	-61,3 %
100 años	Caudal máximo	[l/s]	103573	104464	0,9 %
	Nivel máximo	[m]	2,79	2,8	0,4 %
	Tiempo al pico	[h:mm]	7:30	7:35	0:05
	Tiempo de desborde	[h:mm]	4:30	5:00	0:30
	Precipitación total	[mm]	201,27	201,27	0,0 %
	Infiltración	[mm]	52,42	37,79	-27,9 %
	Precipitación en exceso	[mm]	143,86	161,36	12,2 %
	Almacenamiento	[mm]	5,07	2,14	-57,8 %

A partir de las simulaciones realizadas y con el fin de representar la espacialidad de las modificaciones se construyeron, para cada recurrencia y escenario, dos tipos de mapas. El primer tipo de mapa corresponde a los niveles máximos alcanzados en tanto que el segundo tipo de mapa corresponde a las velocidades máximas desarrolladas en las cunetas. Las respuestas de la cuenca corresponden a una precipitación extrema determinada a partir de las relaciones IDR existentes de 12 horas de duración, con 2, 5 y 100 años de recurrencia. Para una mejor interpretación de los resultados, los mismos fueron discretizados en rangos para ser visualizados en los mapas.

En los mapas de niveles máximos, el primer rango de valores, menos de 0,15 m, corresponde a cunetas que no presentan desborde por poseer tirantes de agua menores al nivel máximo de la cuneta. El segundo rango, entre 0,15 y 0,25 m, corresponde

a aquellas calles cuyos niveles máximos presentan desborde de las cunetas e inundación parcial de las veredas. El rango siguiente, entre 0,25 y 0,50 m, corresponde a las calles donde el agua ha inundado las calzadas, la totalidad de las veredas e ingresado a los lotes de viviendas y comercios. Los próximos rangos de valores son para evaluar la severidad de la inundación en zonas más afectadas.

En la Tabla 4 se presentan los porcentajes de cunetas de calle alcanzadas por cada rango de niveles para los dos escenarios analizados y las distintas recurrencias. A modo ilustrativo en la Figura 5 se presenta el mapa de niveles máximos para el posible escenario futuro en las cunetas de la cuenca en estudio para 100 años de recurrencia. De dichas figuras y tabla puede concluirse que son significativas las cunetas que desbordan afectando veredas y lotes con viviendas y comercios.

Tabla 4. Porcentajes de niveles máximos en cunetas para los dos escenarios y distintas recurrencias.

Niveles máximos	2 años de recurrencia			5 años de recurrencia			100 años de recurrencia		
	actual	futuro	variación	actual	futuro	variación	actual	futuro	variación
menos de 15 cm	74,3 %	66,0 %	-8,3 %	66,7 %	61,3 %	-5,4 %	50,7 %	46,9 %	-3,9 %
de 15 a 25 cm	17,8 %	20,0 %	2,1 %	20,0 %	20,5 %	0,5 %	24,6 %	26,2 %	1,5 %
de 25 a 50 cm	7,0 %	11,4 %	4,3 %	11,5 %	14,4 %	3,0 %	18,7 %	20,2 %	1,5 %
de 50 a 100 cm	0,8 %	2,7 %	1,9 %	1,8 %	3,6 %	1,8 %	5,7 %	6,4 %	0,7 %
más de 100 cm	0 %	0 %	0 %	0 %	0,1 %	0,1 %	0,2 %	0,3 %	0,1 %

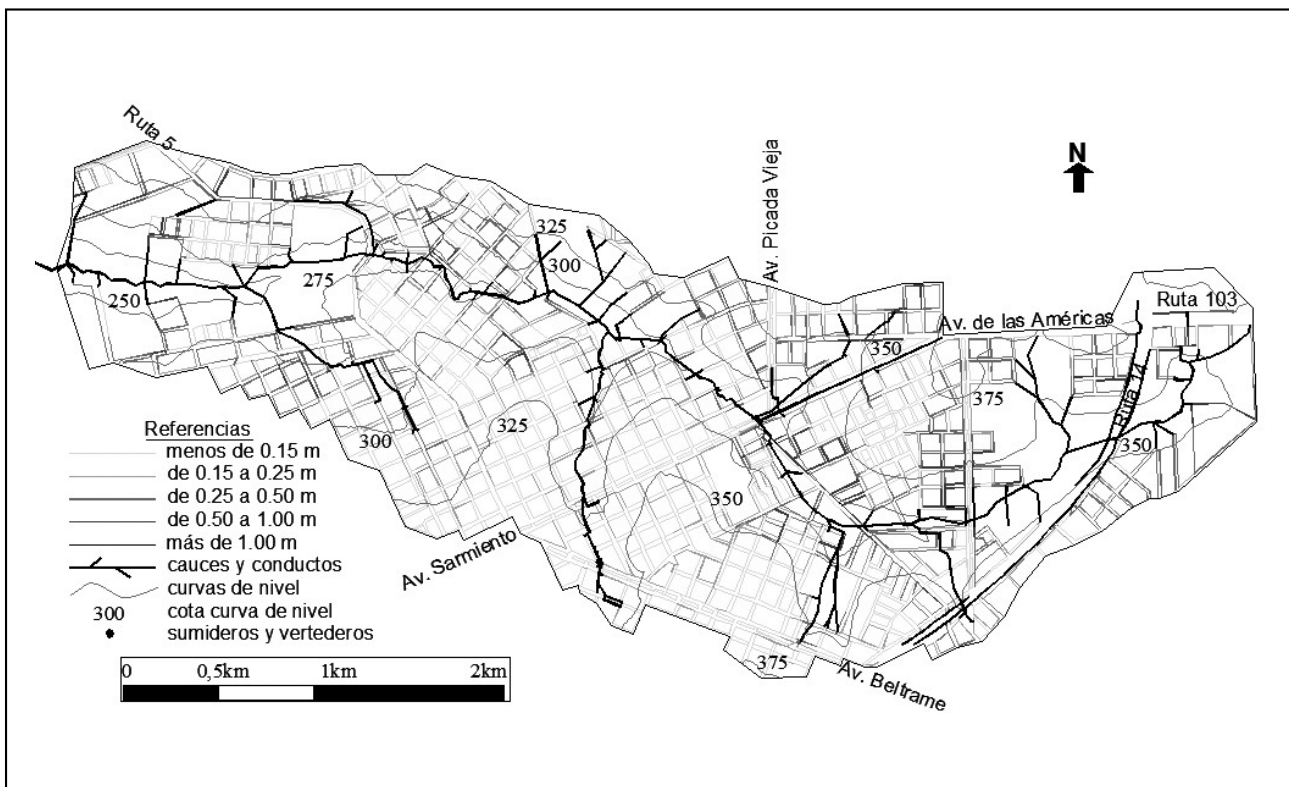


Figura 5. Niveles máximos en cunetas de calles para el posible escenario futuro con 100 años de recurrencia.



En los mapas de velocidades máximas, el rango menor representa las cunetas que alcanzan velocidades menores a 1 m/s y los rangos siguientes presentan valores que se incrementan en 1 m/s cada uno. El mayor de los rangos representa las cunetas donde se alcanza velocidades mayores a los 4 m/s.

En la Tabla 5 se presentan los porcentajes de velocidades máximas alcanzadas dentro de cada rango de valores. Puede visualizarse las importantes velocidades alcanzadas en las

cunetas de la cuenca, velocidades que se desarrollan en toda la cuenca. Aún para una reducida recurrencia las cunetas con velocidades mayores a 1 m/s casi alcanzan el 40 % del total de cunetas de la cuenca. Para 100 años de recurrencias las velocidades máximas alcanzadas superan los 4 m/s. En la Figura 6 se presenta el mapa de velocidades máximas para el posible escenario futuro en las cunetas de la cuenca Mbotaby para 100 años de recurrencia.

Tabla 5. Porcentajes de velocidades máximas en cunetas para los dos escenarios y distintas recurrencias.

Velocidades máximas	2 años de recurrencia			5 años de recurrencia			100 años de recurrencia		
	actual	futuro	variación	actual	futuro	variación	actual	futuro	variación
menos de 1 m/s	63,7 %	59,8 %	-3,9 %	59,4 %	57,6 %	-1,8 %	53,4 %	48,7 %	-4,7 %
de 1 a 2 m/s	31,5 %	33,5 %	2,0 %	34,4 %	34,3 %	-0,1 %	35,7 %	38,4 %	2,7 %
de 2 a 3 m/s	4,3 %	5,9 %	1,6 %	5,5 %	7,1 %	1,6 %	9,6 %	11,2 %	1,6 %
de 3 a 4 m/s	0,5 %	0,7 %	0,1 %	0,6 %	0,7 %	0,2 %	1,2 %	1,3 %	0,2 %
más de 4 m/s	0 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %	0,4 %	0,2 %

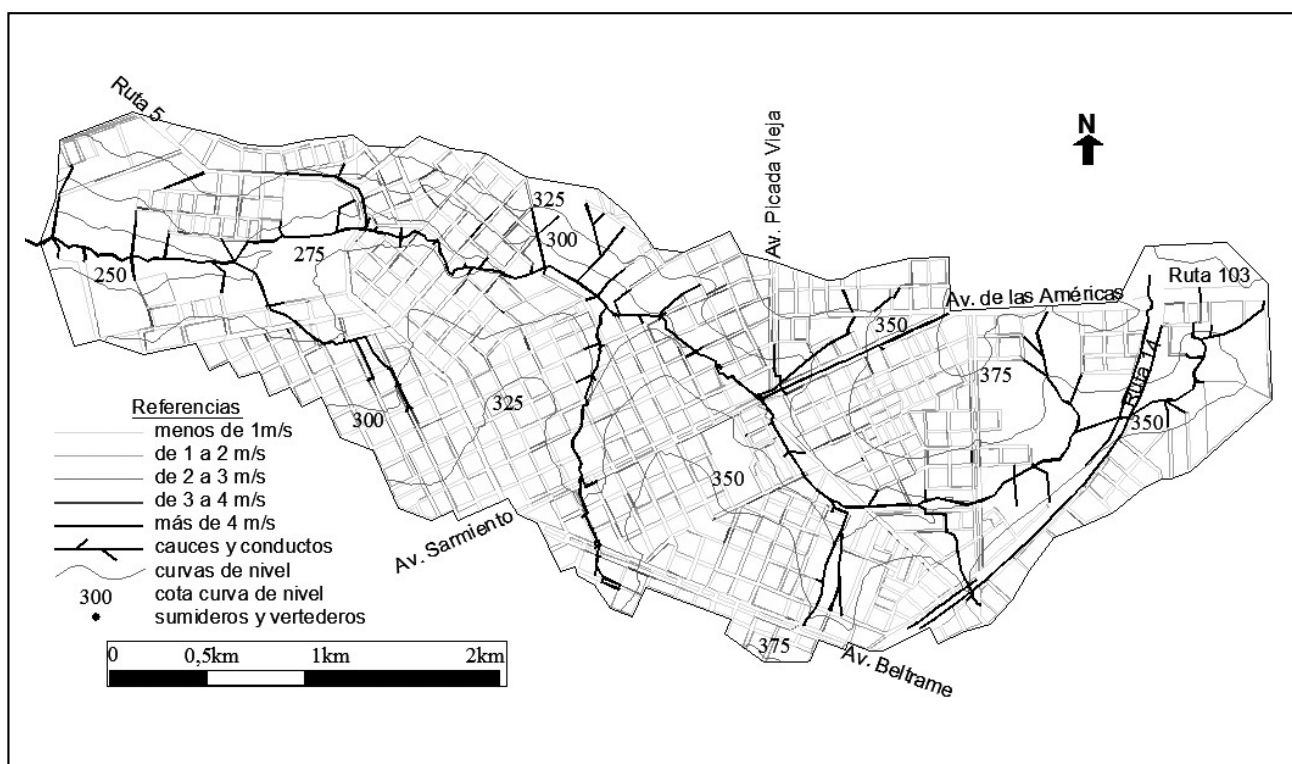


Figura 6. Velocidades máximas en cunetas de calles para el posible escenario futuro y 100 años de recurrencia.

## CONCLUSIONES

El modelo SWMM 5.0vE utilizado para la modelación ha mostrado poseer un interfaz sencilla para la modificación de los parámetros que rigen la respuesta de la cuenca ante distintos escenarios.

Referente a la comparación de los balances hidrológicos de los dos escenarios planteados; la mayor variación se verifica en el almacenamiento de agua dentro de la cuenca, seguido por la modificación en el volumen infiltrado, en tanto que la menor modificación se verifica en el exceso de precipitación.

Todas las modificaciones se originan en el aumento de la impermeabilidad de la cuenca, observándose las mayores variaciones porcentuales de los procesos hidrológicos para menores recurrencias.

El escenario actual de la cuenca Mbotaby presenta 24 % de impermeabilidad, índice relativamente bajo para un área urbana. Para el posible escenario futuro, donde las superficies impermeables sean iguales a las máximas superficies cubiertas permitidas por CEM vigente, la impermeabilidad de la cuenca alcanzaría 45 %, con subcuencas que llegarían al 90 % en el centro de la ciudad.

Aún para el posible escenario futuro el porcentaje total de áreas permeables se presenta como significativo, representando el 55 % de las superficies. Esto se debe en gran medida a las áreas verdes que posee la ciudad, como plaza y reservas ecológicas, situación que realza la importancia de conservar dichas áreas zonas impidiendo el loteo y urbanización de las mismas frente a la presión urbanística.

Respecto a los niveles máximos calculados en las cunetas de las calles puede concluirse que para una recurrencia de 2 años el porcentaje de cunetas desbordadas pasa de 26 % en el escenario actual a 34 % en el posible escenario futuro, representando una alta frecuencia de ocurrencia para esta recurrencia de lluvia. Para 5 años de recurrencia las cunetas desbordadas pasan de 33 % a 39 %. Y para una recurrencia de 100 años las cunetas desbordadas pasan de 48 % a 53 %.

En lo que concierne a velocidades máximas, para una recurrencia de 2 años, las cunetas con las que desarrollan velocidades mayores a 1 m/s pasan de 36 % en el escenario actual a 40 % en el posible escenario futuro. Para una recurrencia de 5 años las cunetas con velocidades máximas mayores a 1 m/s

pasan de 41 % a 42 %. Y para una recurrencia de 100 años los porcentajes varían de 47 % a 51 %.

Dado que en cuencas como la de estudio, con elevadas pendientes, la evaluación de riesgo por inundación en calles se rige por la combinación de niveles de desborde y altas velocidades alcanzados simultáneamente, se observa un aumento del riesgo por inundación ante un posible escenario futuro.

Se observa un sostenido aumento tanto de los niveles máximos como de las velocidades máximas para todas las recurrencias. Variación que es mayor para eventos más frecuentes con menores recurrencias. Se visualiza además que los niveles máximos aumentan en mayor proporción que las velocidades máximas, debido al almacenamiento temporario del agua dentro de la cuenca por colmatación de la capacidad de evacuación del actual sistema de desagües pluviales.

Es menester recordar que, en el posible escenario futuro planteado, las superficies impermeables alcanzan los índices máximos de FOS especificados para cada zonificación, sin embargo el actual CEM no restringe las superficies impermeables de los lotes, por lo que puede ser factible un escenario de mayor impermeabilidad total.

Puede concluirse que los resultados obtenidos en términos de niveles y velocidades máximas y el correspondiente mapeo de esas variables hidráulicas constituyen una importante herramienta a la hora de la planificación integral de la problemática del escurrimiento pluvial urbano actual y futuro de la ciudad de Oberá.

En una futura etapa de los trabajos se prevé determinar tensiones de corte de fondo producidas por el flujo sobre las vías de escurrimiento principales, en vista a lograr en conjunto con la identificación de los tipos de suelos y su resistencia la correspondiente zonificación de vulnerabilidad a erosión.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

BERTONI, J., PEDRAZA, R., COLLINS, J., MACOR, J., PUSINERI, G., OCAMPO, C., MAZA, J. Y SECCHI, A., 1995.

Apuntes de Curso: Sistemas de Drenaje Urbano,  
*FI-UNL. Santa Fe. 300p.*

CELO, 2013. COOPERATIVA ELÉCTRICA LIMITADA OBERÁ.

Comunicación interna.

*Google Earth*, 2013. *Imagen de 3 de mayo de 2010. www.googleearth.com.*

FIO, 2013.

Facultad de Ingeniería de Oberá,

*Universidad Nacional de Misiones. Datos de la estación meteorológica.*

GMME, 2005.

Grupo Multidisciplinar de Modelación de Flujo,

*Manual del usuario del SWMM 5.0 vE. Universidad Politécnica de Valencia. 244p.*

HAUSEN, J., 1919.

Contribución al estudio de la petrografía del territorio nacional de Misiones.

Ministerio de agricultura de la nación, Dirección general de minas, geología e hidrografía.

Boletín N° 21, Serie B (geología). Buenos Aires. 39p.

LITWIN, C. Y FRANCO, P., 1987.

Estudio Hidrológico e Hidráulico de Tributarios del Río Paraná en el Tramo Comprendido entre el Río Iguazú y la Sección Encarnación-Posadas.

*Informe para la Comisión mixta argentino - paraguaya (COMIP). CABA, 245p.*

MEZHER, R., MERCURI, P. Y PIZARRO, M., 2008.

Mapa de precipitación anual en la República Argentina, Serie 1971-2000.

*INTA CABA, Argentina.*

- OLINUK, J., 1998.  
El clima en la localidad de Cerro Azul, período 1967–1996.  
*Estación experimental agropecuaria INTA Cerro Azul. Informe técnico N° 68, ISSN 0326-0135. Posadas, Misiones. 73p.*
- PAPADAKIS, J., 1962.  
Avances recientes en el estudio hídrico de los climas.  
*Publicación. N°81. Instituto de Suelos y Agrotécnia, INTA. Buenos Aires. 62 p.*
- RICCARDI, G., 2004.  
Hidrología en medios antropizados.  
*Libro electrónico. CURIHAM, FCEIA-UNR. <http://c-virtual.fceia.unr.edu.ar>; último acceso 20 de diciembre de 2013.*
- RODRIGUEZ, T. Y RICCARDI, G., 2014a.  
Dinámica del escurrimiento superficial en calles de una cuenca urbana sometida a intensas precipitaciones en la provincia de Misiones.  
*2º Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. Santa Fe. 10p.*
- RODRIGUEZ, T. Y RICCARDI, G., 2014b.  
Evaluación del riesgo por inundación en calles de una cuenca urbana de alta pendiente del centro de Misiones.  
*Cuadernos del CURIHAM (en prensa), UNR Editora. Rosario. 23pp.*
- RODRIGUEZ, T., RICCARDI, G. Y RUBERTO, A., 2014.  
Análisis de una tormenta extrema registrada en la ciudad de Oberá, Misiones.  
*IV Taller de regionalización de precipitaciones máximas. San Miguel de Tucumán. Mayo de 2014. 14p.*
- RODRIGUEZ, T., REINERT, H., RUBERTO, A., GOMEZ, M. Y BERGER, E., 2013a.  
Urbanización e impacto hidrológico en una cuenca de alta pendiente del centro de Misiones.  
*CD actas CONAGUA 2013. San Juan. 12p.*
- RODRIGUEZ, T., REINERT, H., RUBERTO, A., GOMEZ, M., AGUIRRE, M. Y AGUIRRE, A., 2013b.  
Instrumentación y modelación hidrológica superficial de una cuenca urbana de alta pendiente del centro de Misiones.  
*CD actas CONAGUA 2013. San Juan. 12p.*
- SRTM, 2009.  
The Shuttle Radar Topography Mission,  
NASA.
- UDFCD (URBAN DRAINAGE AND FLOOD CONTROL DISTRICT), 1984.  
Drainage Criteria Manual, Vol. 1,2 y 3.  
*Denver, Colorado. 750p.*
- US-SCS (SOIL CONSERVATION SERVICE), 1975.  
Urban Hydrology for Small Watersheds, Technical Release No. 55, SCS-USDA.  
*Washington, D.C.*