

EVALUACIÓN DEL RIESGO POR INUNDACIÓN EN CALLES DE UNA CUENCA URBANA DE ALTA PENDIENTE DEL CENTRO DE MISIONES

Tomás Rodríguez^(1,2) y Gerardo Riccardi^(3,4,5)

¹ Departamento de Ingeniería Civil – Facultad de Ingeniería (UNaM)

² Becario Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

³ Departamento de Hidráulica – Escuela de Ingeniería Civil (FCEIA – UNR)

⁴ Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales (FCEIA – UNR)

⁵ Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario

Riobamba 245 bis. (2000) Rosario. Argentina

e_mail: rodriguezdt@fio.unam.edu.ar

RESUMEN

A partir del avance de la urbanización sobre la selva Paranaense en la Sierra Central de Misiones, se ha comenzado a evidenciar la necesidad de estudiar la respuesta hidrológica de los sistemas antropizados, en una región que hasta el momento había despertado poco interés en la hidrología urbana, donde las condiciones naturales de cobertura vegetal, tipo de suelo y topografía han minimizado los impactos por inundación. La urbanización ha cambiado las condiciones naturales de escurrimiento superficial, aumentando los riesgos por inundación en las ciudades, con la ocurrencia de tirantes y velocidades cada vez mayores en las calles. Este trabajo se focaliza en la evaluación de la dinámica del escurrimiento superficial en las calles dentro de la cuenca del arroyo Mbotaby, en la ciudad de Oberá, Misiones. Con la constitución de un modelo matemático hidráulico - hidrológico con un alto nivel de detalle, en el entorno de SWMM 5.0vE, se logró la determinación de los niveles y velocidades máximas en las cunetas de calle dentro de la cuenca, para distintas recurrencias. Se elaboraron mapas de niveles máximos y de velocidades máximas para eventos lluviosos de 2, 5 y 100 años de recurrencia. Para los diferentes eventos se localizaron y mensuraron las zonas de desborde de cunetas, como así también se sectorizaron las zonas con distintas velocidades de flujo. Finalmente se detectaron zonas de riesgo por inundación de calles debido a la combinación de niveles de desborde y grandes velocidades.

Palabras clave: inundaciones urbanas, alta pendiente, intensas precipitaciones, modelación hidrológica.

ABSTRACT

The progress of urbanization on the Paranaense rainforest –located in the Central Highlands (Sierra Central) area within the province of Misiones– occurred during these last years has recently started to highlight the need of a comprehensive study on the hydrological response of such anthropized systems. Given that natural conditions of this area (i.e. vegetation cover, soil type, ground elevation) have so far minimized the impacts of flooding, little interest was being put on urban hydrology. Urbanization has changed the natural conditions of surface runoff, increasing the risk of flooding in cities, with the occurrence of higher water levels and faster velocities of flow over the streets. This work focuses on the assessment of the dynamics of surface runoff on the streets within the basin of the Mbotaby stream, in the city of Oberá, Misiones. The identification of maximum water levels and flow velocities on street-ditches within the basin was achieved with the aid of the setting up of a hydrological-hydraulic model, using the SWMM 5.0vE environment onto a number of recurrences. Maps of maximum water levels and flow velocities were developed using rainfall events related to 2, 5 and 100 years of recurrence. Flooding areas over street-ditches were located and quantified for each one of the hydrological events; areas with different flow velocities were identified as well. Finally, threatened areas were detected due to the combination of overflowing water levels and high velocities within the basin.

Keywords: urban flooding, steep landscape, heavy rains, hydrological modeling.

INTRODUCCIÓN

La incesante dinámica que plantean las urbanizaciones a priori enfocadas a mejorar la calidad de vida de la gente, ha contribuido a incrementar afectaciones como (a) aumento del riesgo de inundación; (b) decrecimiento de la calidad del agua superficial y subterránea; (c) incremento de los procesos de erosión y sedimentación. El aumento de riesgo de inundación se manifiesta mediante el aumento de caudales máximos y volúmenes de escurrimiento, en conjunto con la disminución de los tiempos de respuesta de las cuencas, debido fundamentalmente al reemplazo gradual de cobertura de suelos naturales por superficies impermeables (calles, techos, etc). Asimismo la ocupación paulatina de los valles de inundación de cursos de agua debido a múltiples y complejos factores sociales y económicos como: presiones urbanísticas, expulsión de habitantes del sistema productivo, pobreza, marginalidad, etc.

Particularmente en Misiones, la selva Paranaense reemplazada por zonas de pastoreo, áreas de cultivo y superficies impermeables, producía una importante amortiguación de las consecuencias negativas de las fuertes precipitaciones de la región. Dicha vegetación, en combinación con la accidentada topografía de la región, la cual posee la capacidad de concentrar rápidamente los excedentes hídricos superficiales, han favorecido históricamente la evacuación de la precipitación en exceso, considerando a la zona como exenta de inundaciones.

Efectivamente, para la visión tradicional de la hidrología sanitarista, las regiones como la de Oberá presentan una óptima situación, con la capacidad de erogar rápidamente los excedentes superficiales. Por tal motivo existen escasos estudios hidrológicos urbanos en la zona, concentrándose los mismos en las grandes ciudades de la región con reducida energía topográfica, como la ciudad de Posadas (Huk y Mercanti, 1999), Corrientes (Depettris et al., 2011) y Resistencia (Ruberto et al., 2011).

Sin embargo, en los últimos años se han producido en la zona eventos extremos, y otros de menor tenor, que han puesto en evidencia la necesidad de estudiar y evaluar el impacto hidrológico de la urbanización en zonas serranas, con ciudades de mediana envergadura, en continua expansión y avance sobre la selva misionera. Rodríguez et al. (2013a) han evaluado el impacto hidrológico de la urbanización sobre la selva Paranaense de la zona centro de Misiones, donde con

el monitoreo de una micro cuenca concluyeron que tras 110 años de urbanización y una impermeabilidad de 61.8 %, el caudal pico verifica un aumento del 4210 % y el volumen de escurrimiento directo un aumento del 1415 %.

OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

El objetivo del presente trabajo es la evaluación del riesgo de inundación de las calles dentro de la cuenca del arroyo Mbotaby, en la ciudad de Oberá, ubicada en el centro de la provincia de Misiones (Figuras 1 (a) y (b)), la cual presenta altas pendientes y un modulo pluviométrico cercano a los 2000 mm. Dicha evaluación se llevó a cabo mediante la determinación de niveles máximos y velocidades máximas a través de la simulación de escurrimiento por medio de modelación matemática hidrológica-hidráulica. La simulación de la transformación lluvia-caudal se realizó con la implementación del modelo SWMM 5.0ve (GMMF, 2005), a través de una constitución con un alto nivel de detalle. El mismo fue calibrado con la utilización de registros de hietogramas de diversas tormentas y los respectivos limnigramas generados en el arroyo receptor de los desagües pluviales urbanos.

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.

Se estima que los mapas de riesgo serán un importante aporte para avanzar en la construcción de un plan director de desagües pluviales hoy inexistente en la ciudad de Oberá.

ZONA DE ESTUDIO Y PROBLEMÁTICA DEL DRENAJE PLUVIAL EXISTENTE

Ciudad de Oberá

La ciudad de Oberá se encuentra ubicada sobre la cúspide de la Sierra central de Misiones, en la zona de parte aguas de las cuencas del río Paraná y Uruguay, por lo que los arroyos que atraviesan la ciudad nacen dentro del actual ejido urbano, presentando pequeñas áreas de aporte. Sin embargo, las características climáticas y topográficas de la región son

propicias para la generación de importantes volúmenes de escurrimiento superficial y elevadas velocidades.

Caracterizado como una región subtropical sin estación seca (Olinuk, 1998), posee una distribución

de precipitaciones a lo largo de todo el año, con un módulo pluviométrico de 1925 mm (INTA Cerro Azul, 2013) Posee además, la distinción de estar sujeta a tormentas de gran intensidad, con importantes volúmenes precipitados en corto tiempo (Olinuk, 1998).

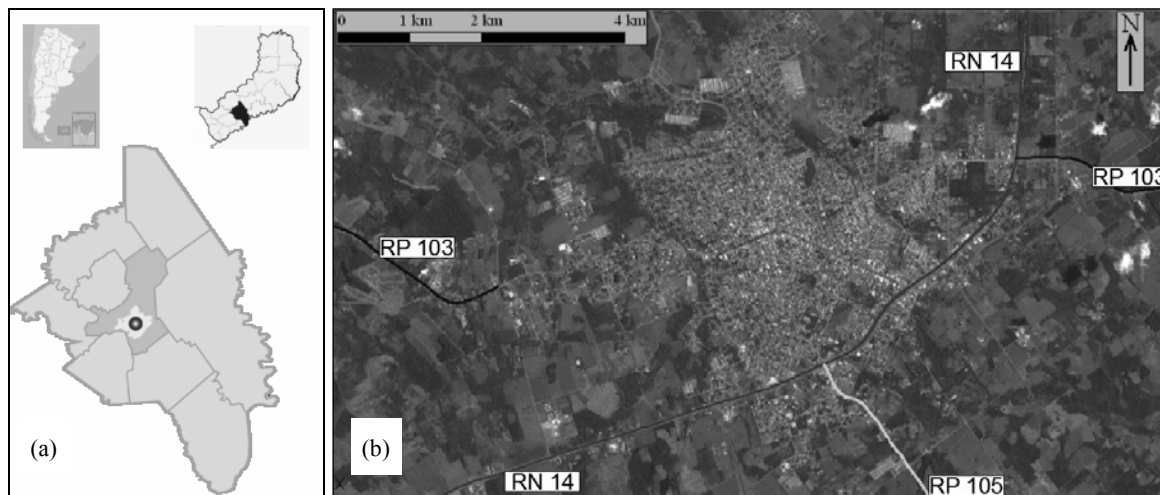


Figura 1. (a) Ubicación geográfica de Oberá; (b) Casco urbano de la ciudad de Oberá (Google Earth ©, 2013).

La accidentada topografía de la región, favorece la formación de numerosos cursos de agua, concentrando rápidamente los excedentes superficiales y reduciendo las zonas de anegamiento. Durante los eventos pluviográficos, en las calles y arroyos de la ciudad se observan tirantes bajos, pero que logran alcanzar altas velocidades.

La caracterización edafológica, complejo suelo - cobertura vegetal, originaria en la región, favorecen las pérdidas por abstracciones iniciales, determinados por el tupido follaje de la selva paranaense, y las pérdidas por infiltración en las arcillas con importantes volúmenes de vacíos (Reinert, 2007) y gran cantidad de materia orgánica, sobre y dentro del perfil estratigráfico.

La creciente impermeabilización de los suelos, por el avance de la urbanización sobre la selva, comienza a afectar de manera significativa la respuesta hidrológica de los sistemas naturales de desagüe de aguas de lluvia. Con cada vez menores superficies permeables, los volúmenes de excedentes hídricos superficiales son cada vez mayores, generando importantes caudales picos y elevadas velocidades que afectan la geomorfología de los cursos de agua. Además, los desbordes de los arroyos se presentan cada vez con mayor frecuencia y las calles de la ciudad comienzan a

reflejar los impactos por urbanización de las subcuencas, con mayores puntos de anegamiento y una creciente asiduidad.

Si bien, hasta el momento no se han lamentado víctimas fatales por inundación, y los evacuados han podido retornar a sus hogares en cuestión de días, con pérdidas materiales parciales, Oberá se presenta como una ciudad joven, con menos de 90 años de edad, que cuenta con la posibilidad de continuar creciendo y, por ende, aumentar los patrones de impermeabilidad, acrecentando el riesgo de inundación, más aún, sin la implementación de un plan director de manejo de los desagües pluviales, tal como sucede en este momento.

La cuenca del arroyo Mbotaby

La cuenca en estudio pertenece al área de aporte del arroyo Mbotaby (arroyo de tábanos, en dialecto guaraní). 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 (Figuras 2 y 5). El arroyo Mbotaby recoge, aproximadamente, el 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 Tuicha (del guaraní, arroyo principal) para formar el arroyo Yabebiry (arroyo de las rayas) el

cual desemboca en el río Paraná, en una zona remansada por la implantación de la represa Yacyreta, ubicada unos 130 km aguas abajo. Hasta el punto de control definido, la cuenca posee 976.41 Has de superficie.

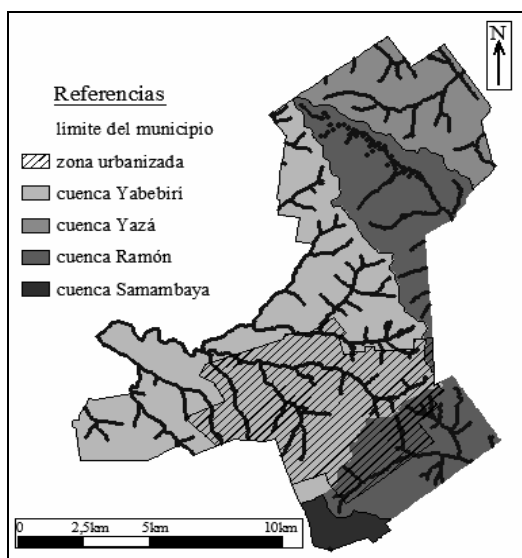


Figura 2. Cuencas hídricas dentro del municipio Oberá.

Topografía de la cuenca

De la zona en estudio, se cuenta con un relevamiento planialtimétrico realizado por C.A.R.T.A. (1962) con una equidistancia 5 m, el cual fue digitalizado y contrastado con superficies creadas a partir de MDT elaborado en base a cotas mundiales del proyecto SRTM (2009), arrojando una excelente correlación entre ambas.

A partir del MDT fue posible confeccionar planos de pendiente de todo el municipio de Oberá tal como se observa en la Figura 3. En ella se visualiza como una gran superficie posee pendientes mayores al 5 % (44 % de la superficie urbana de la ciudad), con una pendiente máxima de 34 %.

En la Figura 4 se observan las curvas de nivel en la cuenca. Las mismas varían entre los 230 y 380 msnm, esto nos permite estimar la pendiente media del cauce principal en 2 %.

Ocupación y usos del suelo

Para la discretización de los usos del suelo se utilizaron simultáneamente cuatro procedimientos a saber:

- Revisión de la Carta orgánica de la ciudad: Oberá cuenta con una carta orgánica donde se detallan las distintas zonificaciones y sus respectivos límites de usos y ocupación de suelo. La misma cuenta con planos que ilustran las zonificaciones permitidas en la ciudad, las cuales coinciden, en gran medida, con la realidad actual.

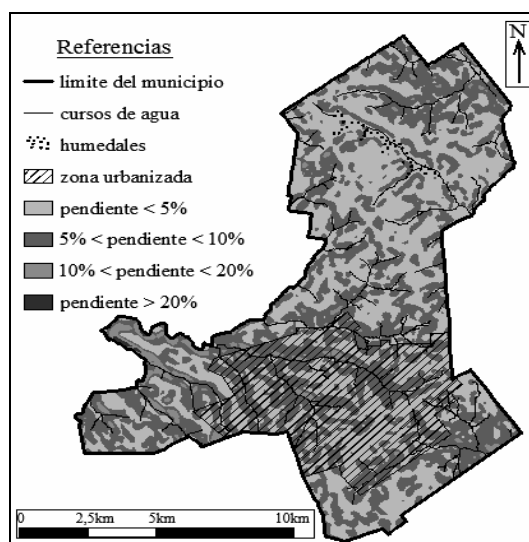


Figura 3. Mapa de pendientes dentro del municipio Oberá.

- Evaluación por imagen satelital: se utilizó la imagen con fecha de mayo de 2010 disponible en la web (Google Earth, 2013). La misma refleja el grado de ocupación de las diferentes zonas y las áreas verdes aun existentes dentro del casco urbano.
- Comparación con investigaciones precedentes: existen investigaciones sobre la calibración de modelos hidrológicos en ambientes urbanos de la ciudad de Oberá (Rodríguez et al., 2013b), donde se ha discretizado minuciosamente los usos del suelo en una micro-cuenca piloto en una zona residencial de densidad media de la ciudad. En dicho trabajo los autores relevaron una cuenca de 10.3 Has discriminado los distintos usos del suelo lote a lote, con el agregado de determinar las superficies impermeables directa e indirectamente conectadas.
- Relevamiento in-situ de puntos particulares: una vez evaluados los tres puntos anteriores, se procedió a recorrer la cuenca para corroborar la información disponible y realizar un relevamiento más detallado de determinadas zonas de interés particular.

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 (USSCS, 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.

En la Figura 5 se ilustra el estado de avance de la urbanización al año 2010 en la cuenca Mbotaby, junto con los cursos de agua, los cuales nacen dentro del casco urbano y atraviesan la ciudad hasta el punto de control seleccionado, por lo que los excedentes superficiales que trasladan son generados exclusivamente en áreas urbanas y pequeñas zonas naturales antropizadas. Además se observa, una particularidad de esta cuenca, donde el parte aguas de la misma coincide, a lo largo de 2.5 km con la divisoria de aguas del río Paraná al Oeste y del río Uruguay al este.

Puede afirmarse que al año 2010 el grado de impermeabilización de la cuenca se valorizaba en un 24 % del área total.

Como pauta final del uso y ocupaciones del suelo dentro de la cuenca, en la Figura 6 se muestra un mapa con las calles, representadas en la figura por las cunetas que poseen a cada lado. En la misma se presentan las zonas que poseen calles con calzadas de pavimento flexible y pavimento tipo empedrado brasilero, calles caracterizadas por poseer cordones cunetas de hormigón. En las calles con cordón cuneta, las veredas están bien delimitadas y poseen una pendiente (aproximadamente 2 %) que fue alterada respecto a la original del terreno. Las calles con cordón cuneta alcanzan el 60 % del total dentro de la cuenca Mbotaby.

Fuera de estas zonas, las calles son de tierra y las cunetas son excavadas en el mismo suelo. Las cunetas de tierra son de la más variada forma y dimensiones, debido a que son los excedentes superficiales las que las moldean mediante los procesos de erosión-sedimentación. En calles sin cordón cuneta, las veredas no están correctamente constituidas y conservan la pendiente del terreno natural, generalmente mayores a las de veredas de proyecto, por lo que necesitan alcanzar tirantes de aguas mayores antes de verse desbordadas y permitir el ingreso de los excedentes hacia los lotes.

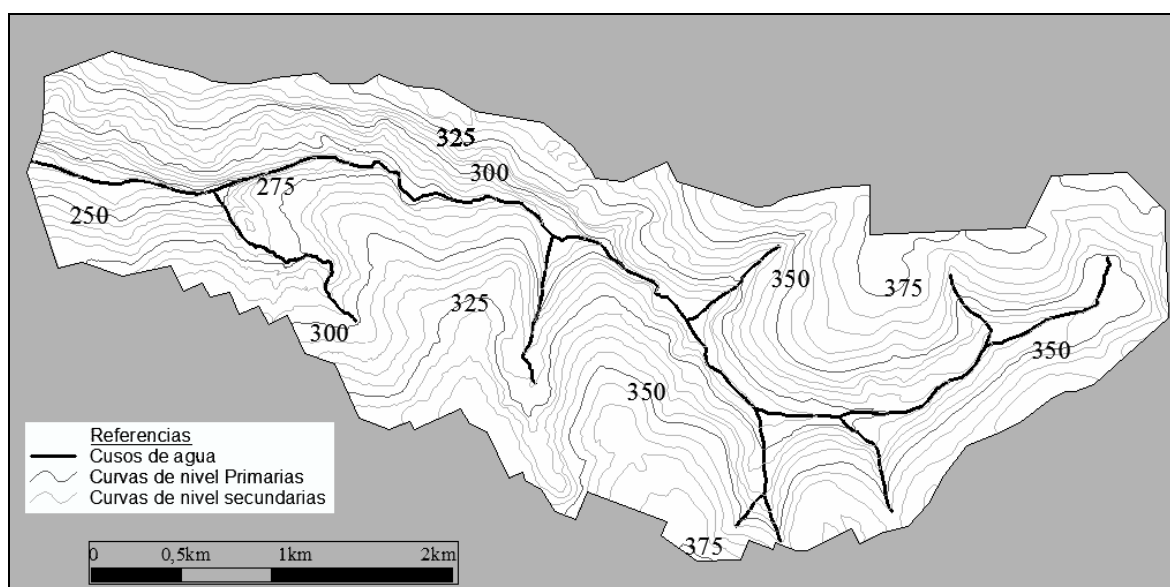


Figura 4. Curvas de nivel en la cuenca Mbotaby.

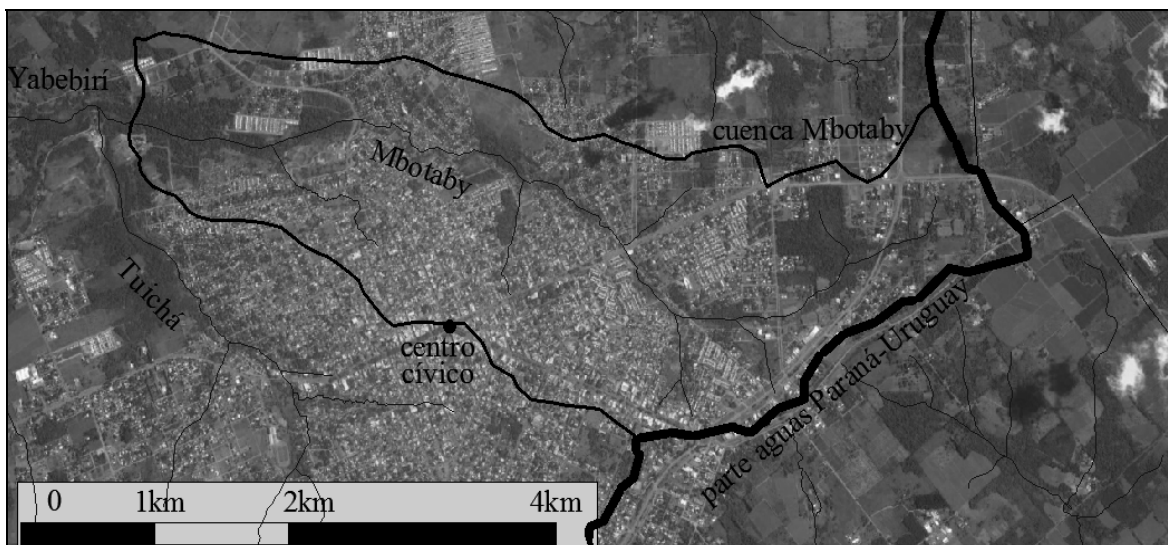


Figura 5. Cuenca del arroyo Mbotaby.

Tabla 1: Zonificación, área impermeable y CN en condición media adoptados.

Zonificación	% de sup. imp.	% de sup. imp. dir. conectada/ sup. imp. totales	CN II
Distrito central	85	90	74
Residencial de densidad alta	65	70	74
Residencial de densidad media	45	50	74
Residencial de densidad baja	25	30	74
Loteos nuevos y zonas de intrusión	5	10	70
Industrias	25	30	74
Parques y canchas	2.5	5	70
Reservas ecológicas	0	0	66
Rutas asfaltadas	45	50	74
Ruta de tierra	25	30	70

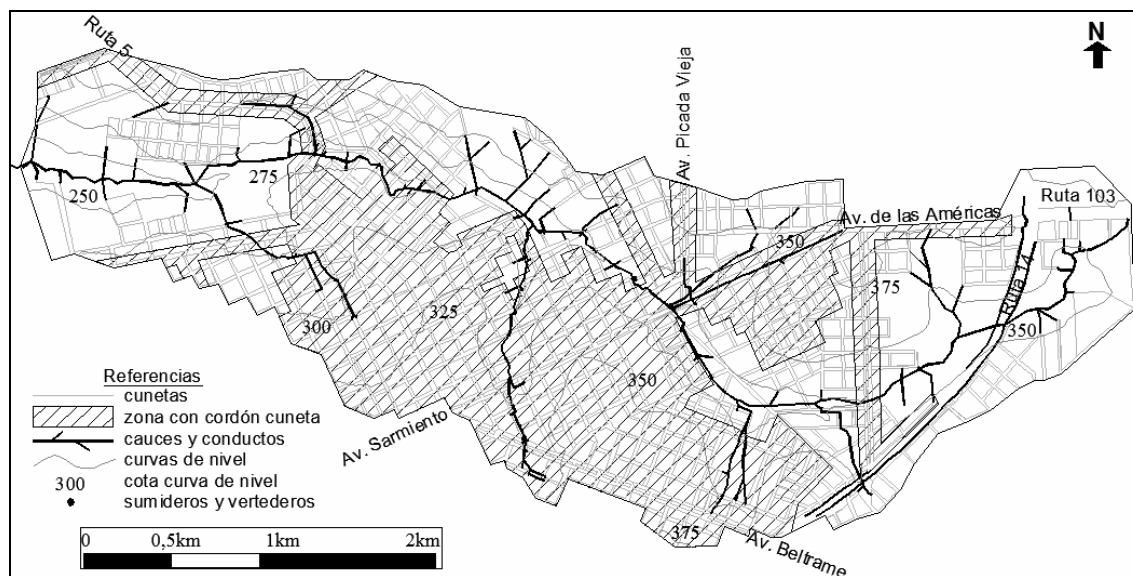


Figura 6. Mapa de zonas con cordón cuenta de hormigón dentro de la cuenca Mbotaby.

Antecedentes de inundaciones

Las últimas inundaciones registradas en la ciudad han puesto de manifiesto una serie de zonas de afectación por inundaciones que se reiteran con cada tormenta de mediana intensidad.

Si bien dentro del casco urbano de la ciudad se encuentran diferentes puntos que han sufrido los impactos de las últimas crecidas de los arroyos urbanos, no todos ellos pertenecen a la cuenca del Mbotaby. Dentro de la cuenca podemos citar un punto donde las habitantes de la zona han sufrido permanentemente inundaciones de distintas severidades, la zona donde el arroyo atraviesa la Avenida de las Américas (Figura 7 (a)). En una primera instancia es posible plantear que el gran problema es el entubamiento del arroyo por debajo de la avenida, y que el mismo se presenta como insuficiente, provocando la inundación de los habitantes aguas arriba de la alcantarilla.

Sin embargo los problemas de inundación se presentan tanto aguas arriba como aguas abajo

del entubamiento, evidenciando, tal como se observa en las curvas de nivel, la verdadera problemática determinada por una zona de menores pendientes y el encuentro de dos grandes cursos de agua, el arroyo Mbotaby propiamente dicho y un antiguo curso materializados actualmente con el sistema de desagües pluviales desarrollado a lo largo de la avenida.

Puntualmente, el día 1 de diciembre de 2012, se produjo en la ciudad una tormenta sin registros precedentes, con graves consecuencias como un número record de evacuados para la ciudad de Oberá y la zona. El desborde de los arroyos Tuicha y Mbotaby provocaron anegamiento, inconvenientes en el tránsito y la destrucción parcial de viviendas y comercios (Figura 7 (b) y Figura 7 (c)). Las altas velocidades desarrolladas arrancaron letrinas y partes de las viviendas ubicadas en el valle de inundación de los cursos de agua. Las personas evacuadas fueron 299, con un número total de afectados estimado en 500 personas (Primera edición web, 2012).



Figura 7. a) Entubamiento av. Las Américas. b) y c) Inundaciones registradas el 1-dic-12.

Durante este evento precipitaron 276 mm en menos de 12 hs, según los registros de la estación meteorológica con la que cuenta la Facultad de Ingeniería de Oberá (FIO, 2013), cuyo hietograma se observa en la Figura 8. Lo crítico de esta tormenta fue la intensidad precipitada, por ejemplo, los 96.4 mm precipitados en los 30 minutos de mayor intensidad.

En la Tabla 2 se detalla la lámina en intensidades registradas en los distintos intervalos de tiempo. Este evento es representativo de las tormentas que habitualmente se presentan en la región, con importantes láminas como así también elevadas intensidades.

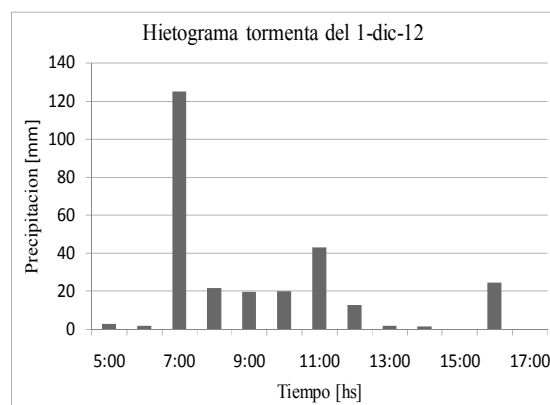


Figura 8. hietograma de la tormenta del día 1 de diciembre de 2012 (FIO, 2013).

Tabla 2: Precipitaciones máximas por intervalos de tiempo de la tormenta de 1-dic-12 (FIO, 2013).

Duración	[min]	1	5	15	30	60	120	240	360	480	720
	[hs]	0.017	0.08	0.25	0.5	1	2	4	6	8	12
Precipitación	[mm]	6.4	21.6	56.4	96.4	131.4	147.0	191.8	242.6	249.0	276.0
Intensidad máxima	[mm/hs]	384.0	259.2	225.6	192.8	131.4	73.5	48.0	40.4	31.1	23.0

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 el software SWMM (StormWater Management Model) financiado inicialmente por la Environmental Protection Agency. En esta oportunidad se trabajó con la versión 5.0vE, realizada por la National Risk Management Research Laboratory de Estados Unidos, traducida al español por el 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 como cunetas, zanjas, canales, conductos, reservorios, etc.. Asimismo el modelo SWMM cuenta con un módulo de calidad de agua.

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 9). 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 de menor elevación de su perímetro. En los casos necesarios de ser representados por otra condición, se subdividieron las manzanas en dos o más subcuencas tributarias. La pendiente de todas las subcuencas se unificó 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.

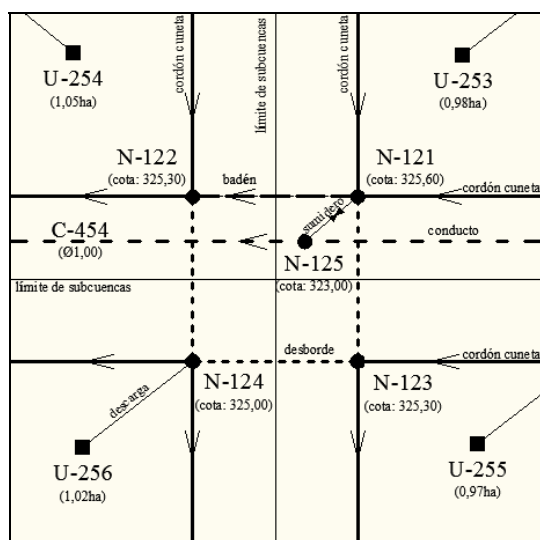


Figura 9. Esquema del modelo en bocacalle.

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, determinada a través de ecuaciones desarrolladas en la bibliografía especializada, en función a sus verdaderas dimensiones y características (Riccardi, 2004).

Áreas directa e indirectamente conectadas

El SWMM admite caracterizar de diferentes maneras el flujo entre las áreas permeables e impermeables dentro de un lote. Se puede optar para que los excedentes superficiales de las zonas permeables e impermeables descarguen los excedentes hacia el sistema de desagües pluviales independientemente

uno de otro, o que los mismos interactúen entre sí antes de descargar sus excedentes al sistema de desagües pluviales. El software permite descargar, total o parcialmente, los excedentes del área permeable a la impermeable o viceversa.

En la ciudad de Oberá, dada las prestaciones hidráulicas de la topografía y el suelo con cobertura vegetal, muchas viviendas descargan el flujo de los pisos y los 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 10 muestra un ejemplo donde el 50 % de la superficie impermeable está directamente conectada.

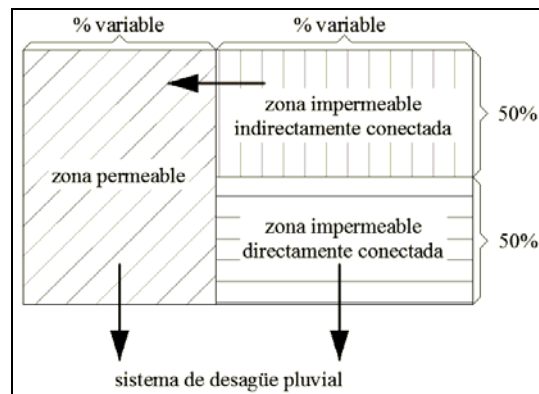


Figura 10. Ejemplo de esquema de interacción entre las zonas permeables e impermeables en las subcuencas.

El ambiente de modelación resultó de una extensión superficial de 976.41 Has, correspondiendo un 12.9 % a áreas impermeables directamente conectadas, 11.6 % a áreas impermeables no conectadas y 75.5 % a áreas permeables.

En resumen el modelo quedó constituido por 972 subcuencas tributarias, 2967 nodos y 3742 elementos conductores de los excedentes hídricos (calles, cunetas, sumideros, zanjas, canales, conductos y arroyos).

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 11). Para las bocas de tormenta verticales se utilizaron las Ecuaciones 1 y 2 presentadas por Bertoni et al., (1995) citado por Riccardi (2004).

$$Q = 1.656 L y_0^{1.5} \rightarrow y_0 \leq 1.5 h \quad (1)$$

$$Q = 0.67 L h [2 g (y_0 - h/2)]^{0.50} \rightarrow y_0 > 1.5 h \quad (2)$$

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 del 65 % (UDFCD, 1984; citado por Riccardi, 2004).

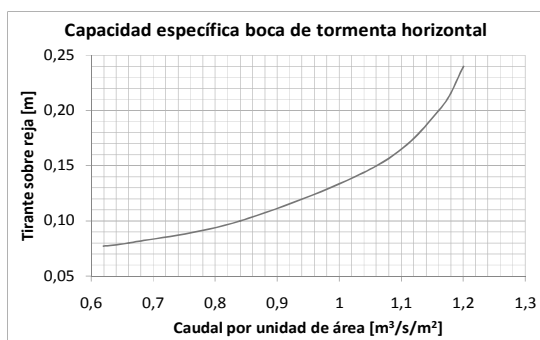


Figura 11. Capacidad específica de una boca de tormenta horizontal. (UDFCD, 1984; adaptado por Riccardi, 2004).

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 cuales se detallan en la Tabla 3. Los mismos representan

eventos con distintas características, todos ellos factibles de ocurrir en la zona. Los parámetros a calibrar fueron los distintos coeficientes de resistencia empleados en las distintas superficies y elementos de conducción.

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 en el campus universitario dentro del casco céntrico de la ciudad, cercana al baricentro de la cuenca en estudio. Dicha estación cuenta con un pluviógrafo digital a cangilones, capaz de discretizar las precipitaciones en intervalos de hasta 1 minuto y 0.2 mm. Para la determinación del caudal erogado registrado se utilizó el limnigrama registrado y la curva H-Q determinada con los datos de salida (altura-caudal) del modelo calibrado en el punto de control de la cuenca. La condición de humedad antecedente considerada en los eventos de calibración fue de tipo media empleándose el número de curva CN medio (Tabla 1).

Tabla 3: Tormentas utilizadas para la calibración del modelo.

Fecha	P. total	Duración	Intensidad máxima en 5 minutos
[dd-mmm-aa]	[mm]	[d:hs:min]	[mm/hs]
06-ago-13	66.6	0:04:05	264
23, 24, 25 y 26-ago-13	258.6	3:18:00	70
21-sep-13	25.6	0:05:15	38
21-oct-13	122.2	0:04:00	194

Los limnigramas comparados fueron obtenidos por observación directa de las reglas limnimétricas instaladas en el punto de control de la cuenca, obteniéndose lecturas cada 5 minutos.

En la Figura 12 se presenta el hietograma de la tormenta del 6-ago-13 donde se registró un evento con una precipitación total de 66.6 mm con una duración de 4 horas y 5 minutos, la misma muestra las intensidades de precipitación en intervalos de 5 minutos.

La Figura 13 presenta el limnigrama registrado durante el evento y el limnigrama resultante de la modelación de un evento del 06-ago-2013. Como resultado se obtuvo que, el volumen de escurrimiento directo erogado por el modelo durante el periodo observado es 1.5 % mayor al volumen registrado. Con un nivel pico modelado 0.5 % mayor al registrado, aunque coincidentes en tiempo de ocurrencia.

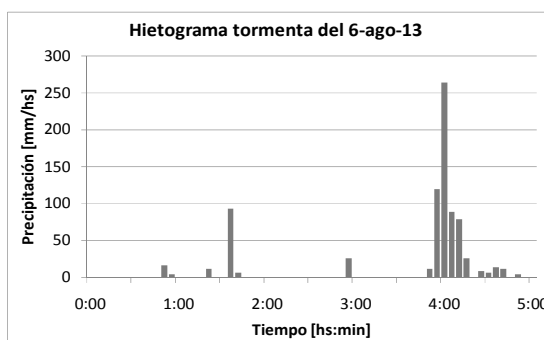


Figura 12. Hietograma tormenta del 6 de agosto de 2013.

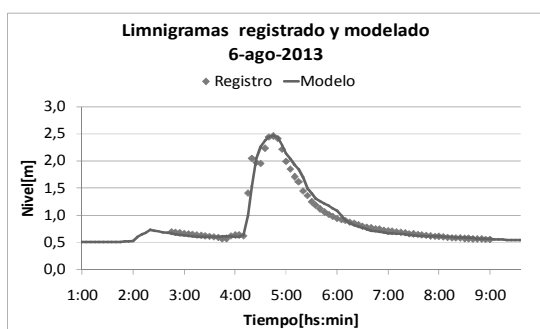


Figura 13. Limnigramas registrado y modelado tormenta del 6 de agosto de 2013.

En la rama ascendente del limnigrama registrado se observa una singularidad, con un pequeño pico. El mismo coincide con el nivel de desborde del arroyo. En cuanto a la rama descendente, los niveles registrados son levemente menores a los del modelo, coincidiendo los mismos hacia el final del limnigrama.

En la Figuras 14, 15 y 16 se presentan los limnigramas registrados y modelados de las tormentas del 26-ago-13, 21-sep-13 y 21-oct-13 respectivamente.

Para la tormenta del 26-ago-13 la diferencia en el volumen de escurrimiento durante el registro es de -0.2 %, con niveles máximos, modelado y registrado, coincidentes en su valor, con una diferencia de ocurrencia de 10 min.

En la modelación del evento del 21-sep-13 la diferencia en el volumen de escurrimiento durante el registro es de -3.1 %, el cual representa la máxima diferencia modelada.

Mientras que para la tormenta del 21-oct-13, la diferencia en el volumen de escurrimiento durante el registro es de -0.3 %.

Los parámetros finalmente resultantes de la calibración se presentan en la Tabla 4.

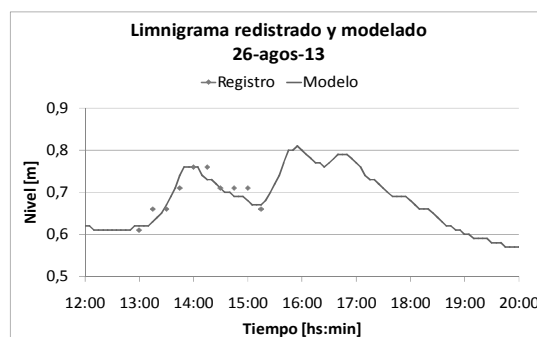


Figura 14. Limnigramas registrado y modelado tormenta del 26 de agosto de 2013.

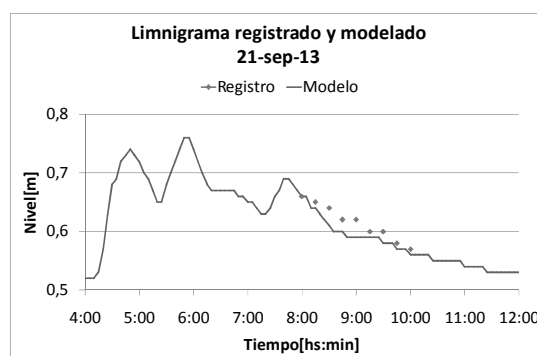


Figura 15. Limnigramas registrado y modelado tormenta del 21 de septiembre de 2013.

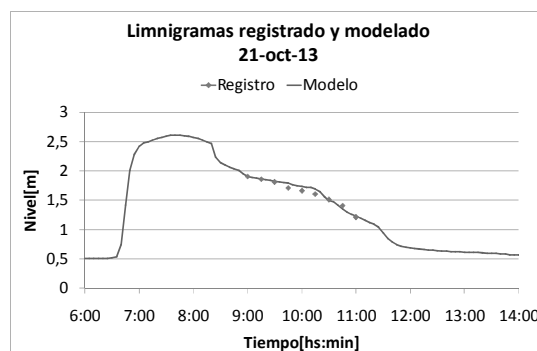


Figura 16. Limnigramas registrado y modelado tormenta del 21 de octubre de 2013.

Se concluye que a partir de los resultados de los cuatro eventos pluviográficos modelados en el proceso de calibración, se logró una aceptable reproducción de los niveles de agua en la sección de control de la cuenca, lo que permite inferir que la modelación representa adecuadamente los procesos hidrológico-hidráulicos dentro de la cuenca Mbotaby. Es de hacer mención que para un mejor

ajuste del modelo y la correspondiente validación del mismo, es necesario continuar con los aforos, a fin de completar un mayor número de eventos con registros de precipitaciones y niveles tanto en la sección de control como en puntos internos.

Tabla 4: Coeficiente de Manning utilizados en las distintas superficies de escurrimiento.

Coeficientes de Manning utilizados [adm]		
Subcuencas	Áreas permeable	0.100
	Áreas impermeable	0.018
Calles de pavimento flexible	Calzada	0.020
	Cuneta	0.018
	Veredas	0.025
Calles de empedrado tipo brasilero	Calzada	0.025
	Cuneta	0.018
	Veredas	0.025
Calles de tierra	Calzada	0.040
	Cuneta	0.030
	Veredas	0.050
Conductos de hormigón		0.015
Zanjas de tierra	Lecho	0.030
	Valle	0.100
Arroyos	Lecho	0.035
	Valle	0.075

ELABORACIÓN DE MAPAS DE NIVELES Y VELOCIDADES MÁXIMAS

Una vez calibrado el modelo de simulación, se procedió a su explotación enfocada a la elaboración de mapas de riesgo de inundación de las calles de todo el ambiente en estudio para recurrencias de 2, 5 y 100 años.

Primeramente se determinaron las tormentas críticas a utilizar, objetivando la selección de la duración de aquellas tormentas que producen los mayores caudales a misma condición de humedad antecedente. Posteriormente se llevaron a cabo las respectivas corridas del modelo de simulación para determinar los niveles y velocidades en cada uno de los elementos constitutivos del sistema de drenaje pluvial en los que se constituyó el modelo.

Finalmente a partir de los cálculos de niveles y velocidades, se procesaron dichos resultados a los efectos de su representación en formato de mapas de niveles máximos y mapas de velocidades máximas.

Determinación de la tormenta crítica

En la determinación de la tormenta crítica se utilizaron curvas de intensidad, duración y frecuencia de precipitaciones máximas disponibles de la localidad de Cerro Azul, y con el método de los bloques alternos (Riccardi, 2004) se confeccionaron distintos hietogramas de precipitación para diversas duraciones de tormentas. Con el objetivo de encontrar la precipitación que produzca los mayores tirantes en las cunetas de la cuenca, se evaluó cual es la duración de la tormenta crítica. Una vez establecida la duración de la tormenta crítica se confeccionaron los hietogramas de diseño para 2, 5 y 100 años de recurrencia.

Curvas i-d-f

La estación meteorológica experimental del INTA Cerro Azul se encuentra emplazada a las afueras de la Localidad de Cerro Azul en el Departamento de Leandro N. Alem, en el centro de la Provincia de Misiones. Además de contener la mayor cantidad y calidad de datos, esta estación, al igual que la ciudad de Oberá, se sitúa a la vera de la Ruta Nacional 14, sobre la Sierra Central de Misiones. La misma se encuentra a 36 km lineales del centro de la ciudad de Oberá en dirección Suroeste.

La curva intensidad–duración–frecuencia se describe a través de una función ajustada por mínimos cuadrados de tipo hiperbólica (Litwin y Franco, COMIP, 1987) según la ecuación (3) (Figuras 17 y 18), cuyos coeficientes se detallan en la Tabla 5.

$$i = \frac{a}{D^{0.82} + c} \quad (3)$$

Donde: i es la intensidad en mm/hs; D es la duración de la tormenta en minutos y a y c son constantes tabuladas en función de los años de recurrencia.

Cabe hacer mención que según las curvas i - d - f descriptas anteriormente, la tormenta del 1-dic-12 con una intensidad media de 23 mm/hs y 12 horas de duración posee una recurrencia mayor a los 200 años, lo que evidencia la severidad de este y otros eventos que azotan la ciudad de Oberá.

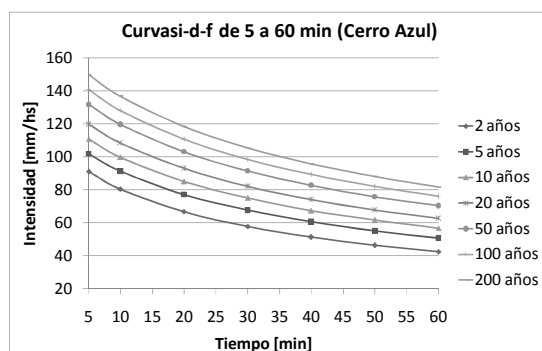


Figura 17. Curvas i-d-f de 5 a 60 minutos para Cerro Azul (66-84) (Litwin y Franco, COMIP, 1987).

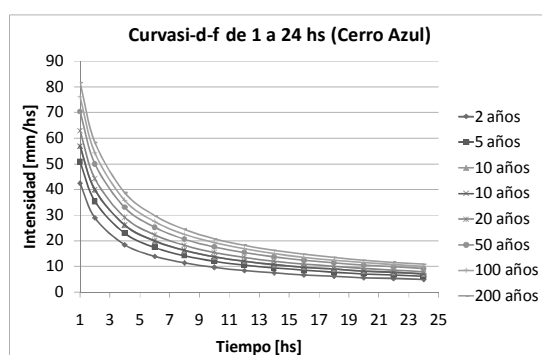


Figura 18. Curvas i-d-f de 1 a 24 horas para Cerro Azul (66-84) (Litwin y Franco, COMIP, 1987).

Tabla 5: Constantes de las curvas i-d-f Cerro Azul (66-84) (Litwin y Franco, COMIP, 1987).

Recurrencia [años]	a	c
2	1984.01	18.06
5	2530.53	21.12
10	2916.41	22.6
20	3285.62	23.68
50	3765.52	24.87
100	4123.72	25.57
200	4481.44	26.19

Duración de tormenta crítica

Para determinar la duración de la tormenta crítica asociada a cada recurrencia para el escenario actual, se llevaron a cabo simulaciones de modo de hallar aquella duración que produzca los mayores caudales en la sección de cierre. De este modo se obtuvieron distintas tormentas con diferentes duraciones y se confeccionaron los hietogramas de diseño para 2 años de recurrencia, los cuales se ilustran en la Figura 19.

El método de los bloques alternos presenta la particularidad de que los bastones de precipitaciones

máximas no varían con la duración de la tormenta y simplemente se van desplazando para ubicarse en el centro de la tormenta. Por lo que es esperable que los caudales generados aumenten con el incremento de la duración de la tormenta, debido a que al aumentar la duración de la tormenta, cuando ocurren los máximos del hietograma, el suelo se encuentra cada vez más húmedo disminuyendo las pérdidas.

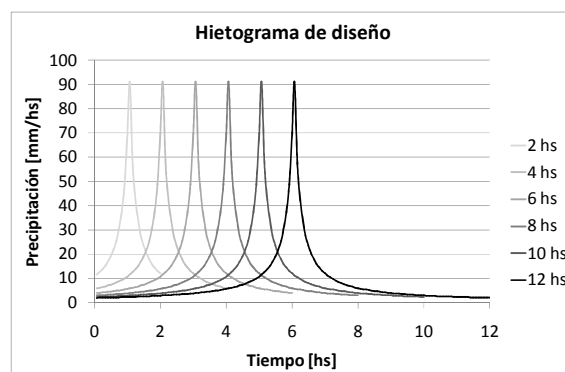


Figura 19. Hietogramas de diseño para la determinación de la tormenta crítica de 2 a 12 hs de duración y 2 años de recurrencia.

Los caudales continúan aumentando hasta establecerse en un máximo invariante con la duración de la tormenta. 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.

Para este análisis 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.

A modo ilustrativo, se presenta en las Figuras 20 y 21 las correspondientes variaciones de caudal máximo con el incremento de la duración de la tormenta crítica desde 2 a 12 hs para una recurrencia $R = 2$ años. Se verifica que, en el punto de cierre de la cuenca, es necesario una tormenta de 12 hs de duración para que la variación en el caudal máximo sea del 2 % respecto al anterior, con una variación en el tirante máximo de 0.01 m, como se presenta en la Tabla 6.

Si observamos en la Figura 21, los caudales máximos en este tramo de la calle Salta, para una duración de 8 hs, el mismo presenta una variación menor al 2 %,

respecto de la tormenta de 6 hs, y los tirantes alcanzados para la duración de 8 hs son similares a los de 10 y 12 hs de duración (Tabla 7). Respecto a la duración esperable determinada y su contrastación con duraciones observadas, puede decirse que la tormenta que provocó las inundaciones del 1 de diciembre de 2012, indica que en la región pueden presentarse tormentas importantes de 12 hs de duración. Además, según los datos del pluviómetro de la Cooperativa Eléctrica Limitada Oberá, se han registrado en los últimos 12 años eventos de hasta 4 días de duración y numerosos registros con 2 días de duración.

Se decidió así trabajar con tormentas críticas de 12 hs de duración, ya que las mismas producen caudales y tirantes cercanos a los máximos esperables y una duración mayor de la tormenta agregaría un tiempo de cálculo innecesario a la modelación y no aportará una apreciable precisión al cálculo.

Hietogramas de diseño

Mediante la técnica del método de bloques alternos y los datos obtenidos de las i-d-f Cerro Azul, se confeccionaron 3 hietogramas de diseño, para 2, 5 y 100 años de recurrencia. Cada uno de 12 horas de duración, con pulsos de precipitación discretizados cada 5 minutos.

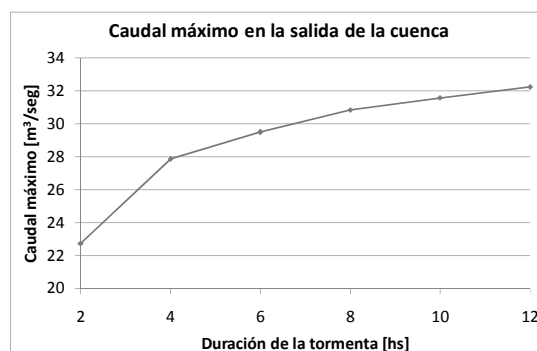


Figura 20. Caudales máximos vs duración de la tormenta en la salida de la cuenca para 2 años de recurrencia.

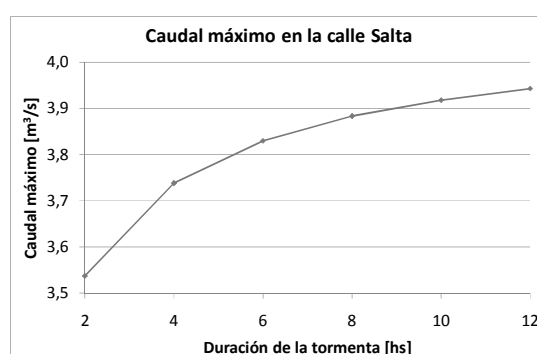


Figura 21. Caudales máximos vs duración de la tormenta en la calle Salta para 2 años de recurrencia.

Tabla 6: Caudales y tirantes máximos alcanzados en la salida de la cuenca para distintas duraciones de tormenta y 2 años de recurrencia.

Duración	P. total	Intensidad media	Control			
			tp	caudal máximo		hmax
[hs]	[mm]	[mm/hs]	[hs]	[m³/s]	% incremento	[m]
2	57.72	28.9	2:40	22.741	-	2.07
4	73.79	18.4	4:10	27.869	18.4%	2.25
6	83.33	13.9	5:35	29.500	5.5%	2.29
8	90.16	11.3	6:25	30.836	4.3%	2.35
10	95.49	9.5	7:15	31.572	2.3%	2.37
12	99.88	8.3	8:25	32.230	2.0%	2.38

Tabla 7: Caudales y tirantes máximos alcanzados en la calle Salta para distintas duraciones de tormenta y 2 años de recurrencia.

Duración	Precipitación	Intensidad media	C-914(calle Salta)			
			tp	caudal máximo		Hmax
[hs]	[mm]	[mm/hs]	[hs]	[m³/s]	% incremento	[m]
2	57.72	28.9	1:15	3.537	-	0.26
4	73.79	18.4	2:10	3.738	5.4%	0.26
6	83.33	13.9	3:10	3.830	2.4%	0.26
8	90.16	11.3	4:10	3.883	1.4%	0.27
10	95.49	9.5	5:10	3.918	0.9%	0.27
12	99.88	8.3	6:10	3.943	0.6%	0.27

Las recurrencias seleccionadas corresponden a los escenarios recomendados por la bibliografía especializada para la evaluación de los sistemas menor y mayor (Riccardi et al., 2008).

Los eventos de 2 años de recurrencia representan eventos de alta periodicidad, con un 50 % de ocurrencia en un año, determina la afectación del sistema ante tormentas recurrentes. Los eventos pluviográficos de 5 años de recurrencia se utilizan para diseñar los sistemas menores o iniciales de desagües pluviales, de manera que se verifique la suposición de impacto cero por inundación. Mientras que los eventos de 100 años, son utilizados para diseñar los sistemas mayores de desagües pluviales o al menos evaluar la respuesta del sistema ante una lluvia extraordinaria, cuantificar los daños esperables y planificar el accionar de los sistemas de emergencia.

Para 2 años de recurrencia son esperables 99.9 mm de precipitación total, con una intensidad media de 8.3 mm/hs y una intensidad máxima durante 5 minutos de 91 mm/hs (Figura 22). Para 5 años de recurrencia, el total precipitado esperable es de 125.8 mm, con una intensidad media de 10.5 mm/hs y una intensidad máxima de 101.8 mm/hs (Figura 23). En tanto que para 100 de recurrencia, obtenemos 201.2 mm totales precipitados, con una intensidad media de 16.8 mm/hs y 140.7 mm/hs durante los 5 minutos de mayor intensidad (Figura 24).

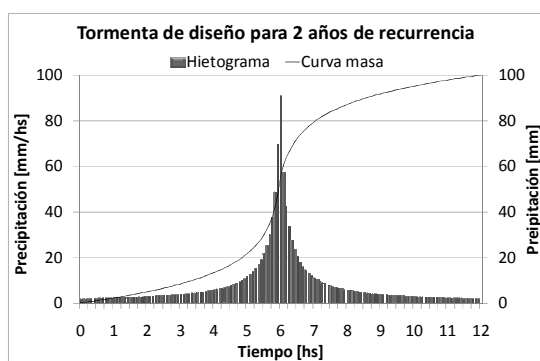


Figura 22. Hietograma y curva masa de la tormenta de diseño para 2 años de recurrencia.

Simulaciones mediante modelación matemática hidrológica-hidráulica

Una vez definidos los hietogramas de diseño para cada recurrencia, se llevaron a cabo las simulaciones mediante el modelo matemático hidrológico-hidráulico SWMM (GMMF, 2005). Todas las corridas arrojaron errores de continuidad hidrológica

o 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.

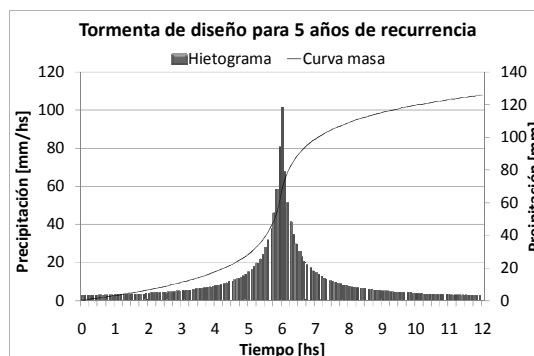


Figura 23. Hietograma y curva masa de la tormenta de diseño para 5 años de recurrencia.

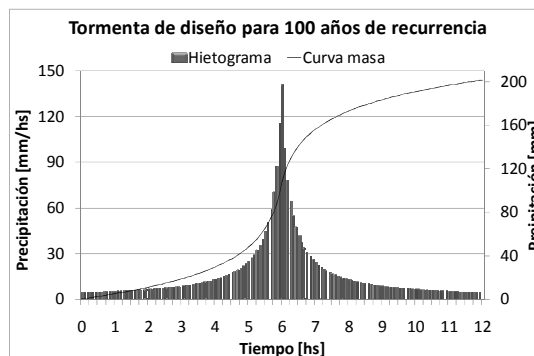


Figura 24. Hietograma y curva masa de la tormenta de diseño para 100 años de recurrencia.

El paso de tiempo de cálculo que ha permitido verificar el menor error en continuidad fue de $dt=1\text{seg}$. 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 2967 nodos y 3742 elementos con que se constituyó el ambiente modelado, el tiempo de cálculo de cada tormenta fue de 26 min.

RESULTADOS OBTENIDOS

A partir de las simulaciones realizadas se obtuvieron, para cada recurrencia, dos mapas. Uno que detalla los niveles máximos alcanzados y otro similar con las velocidades máximas desarrolladas en las cunetas.

Los 6 mapas obtenidos constituyen la respuesta de la cuenca ante una precipitación 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 aquellas 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 aquellas zonas más afectadas.

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.

Mapas de Niveles Máximos

En la Figuras 25, 26 y 27 se presentan los mapas de niveles máximos alcanzados en las cunetas de la cuenca en estudio para 2, 5 y 100 años de recurrencia respectivamente. En la Tabla 8 se presentan los porcentajes de cantidad de cunetas comprendidos dentro de cada rango de valores. De dichas figuras y tabla puede concluirse que son significativas las cunetas que desbordan afectando veredas y lotes con viviendas y comercios.

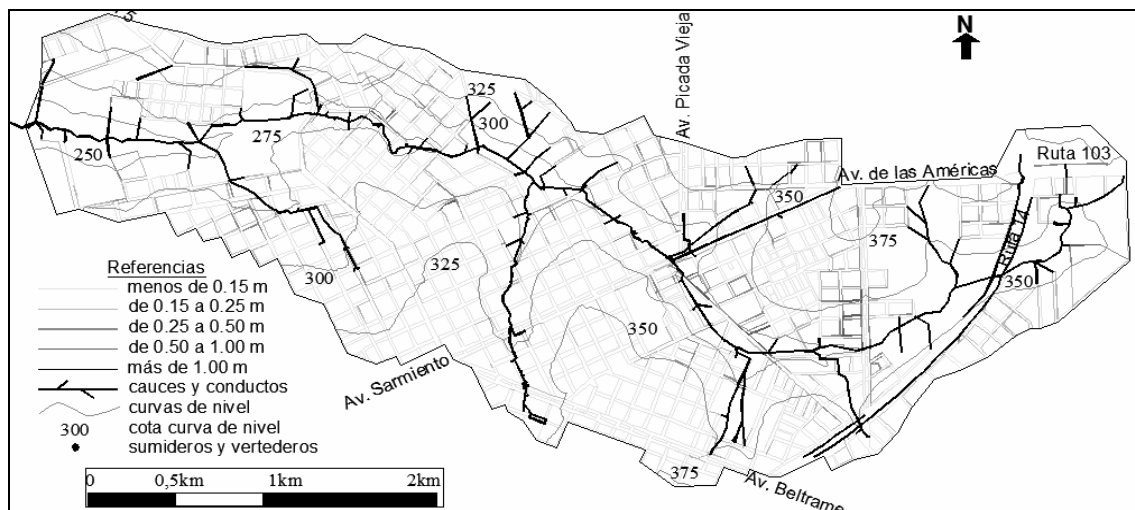


Figura 25. Niveles máximos en cunetas para una tormenta de 12 hs de duración y 2 años de recurrencia.

Tabla 8: Porcentajes de niveles máximos en cunetas para las distintas recurrencias.

Niveles máximos	Años de recurrencia		
	2	5	100
menos de 0.15 m	74.3%	66.7%	50.7%
de 0.15 a 0.25 m	17.8%	20.0%	24.6%
de 0.25 a 0.50 m	7.0%	11.5%	18.7%
de 0.50 a 1.00 m	0.8%	1.8%	5.7%
más de 1.00 m	0.0%	0.0%	0.2%

Mapas de Velocidades Máximas

En las Figuras 28, 29 y 30 se visualizan los mapas con las velocidades máximas alcanzadas para 2, 5 y 100 años de recurrencia respectivamente. A continuación de las mismas, se detallan en la Tabla 9, 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 1.00 m/s casi alcanzan el 40 % del total de cunetas de la cuenca. Para 100 años de recurrencia las velocidades máximas alcanzadas superan los 4 m/s.

De la comparación entre los 6 mapas descriptos anteriormente, surgen 7 zonas dentro de la cuenca que se destacan por alcanzar grandes valores de niveles y velocidades en las calles. En ellas las calzadas, veredas y lotes se ven afectados severamente, por la combinación de tirantes mayores al máximo admitido por la cuneta, en combinación con velocidades capaces de arrastrar objetos y personas. Las zonas son:

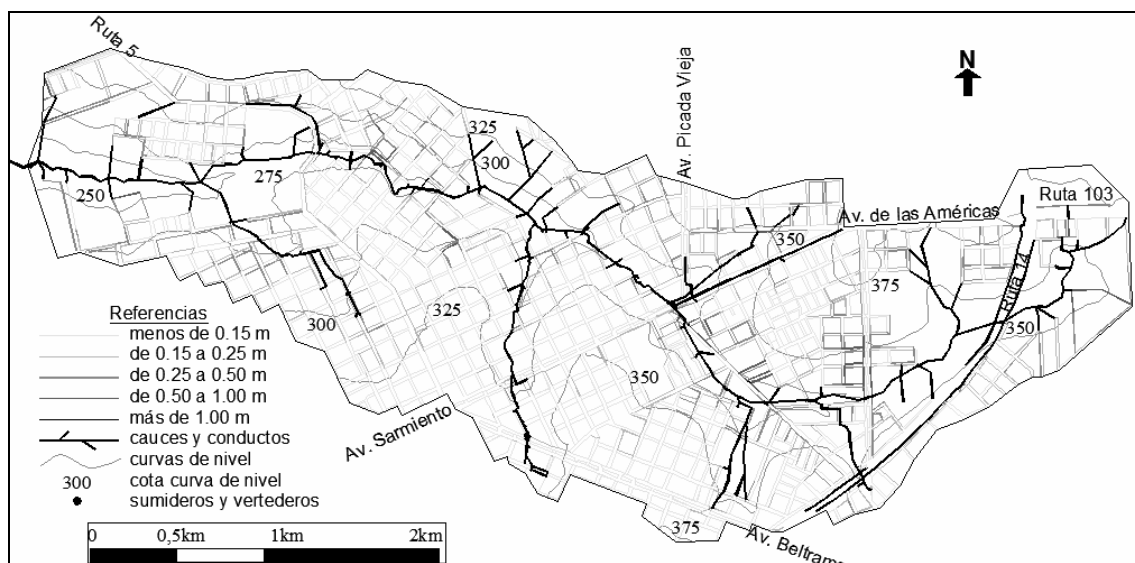


Figura 26. Niveles máximos en cunetas para una tormenta de 12 hs de duración y 5 años de recurrencia.

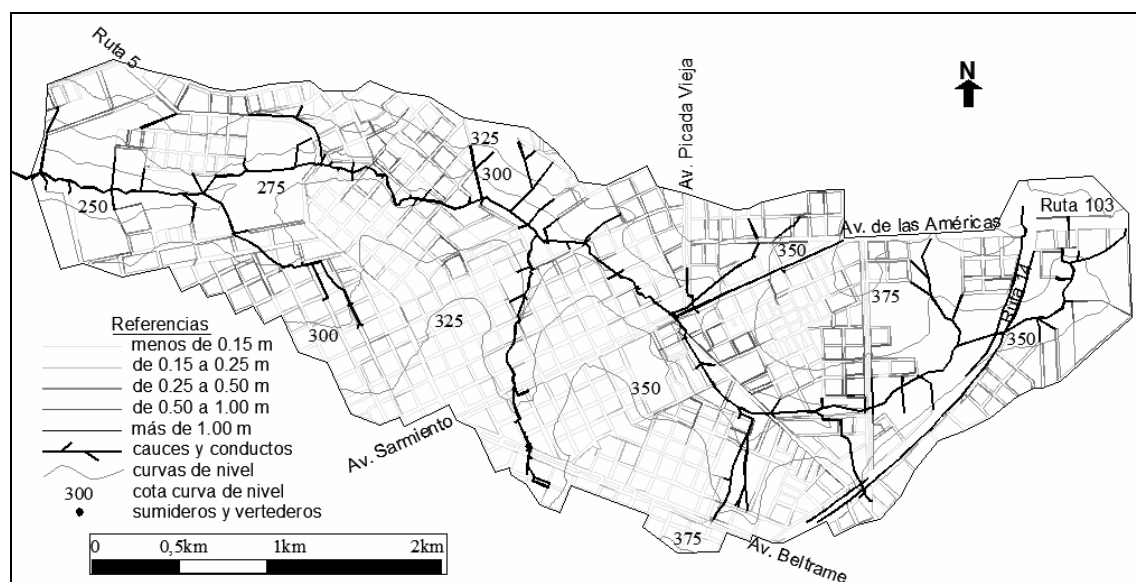


Figura 27. Niveles máximos en cunetas para una tormenta de 12 hs de duración y 100 años de recurrencia.

- (1) Calle Salta entre Sargento Cabral y French: es la zona más céntrica donde se alcanzan valores críticos de niveles y sobre todo de velocidades. Con una pendiente media del 6 %, alcanza un valor máximo de velocidad de 3.44 m/s, para una recurrencia de diseño de 5 años, en combinación con un tirante de 0.29 m, lo que implica el ingreso del agua a las viviendas residenciales de la zona.
- (2) Esquina de las calles Urquiza y San Luis: es una zona donde son afectadas varias calles a la redonda, por tratarse de zona relativamente plana que recibe los excedentes de varias cunetas de gran pendiente. El nivel máximo alcanzado, para 5 años de recurrencia, para un tramo de calle es de 0.41 m, con una velocidad máxima de 2.24 m/s.
- (3) Calle Polonia entre Yaguareté y Dos de Mayo: es una zona totalmente urbanizada, donde existen calles con pendientes mayores al 15 %. En ella es esperable una velocidad de 3.50 m/s y un tirante de 0.28 m para 5 años de recurrencia. Actualmente no posee cordones cunetas, por lo que las velocidades serán mayor al momento de materializar las mismas.
- (4) Calle Primeros Colonizadores entre Suecia y Matheu: similar a lo que sucede en la zona 2, la calle Primeros Colonizadores posee una zona plana que recibe las aguas de una serie de

calles de gran pendiente. Aquí se alcanza el máximo nivel de agua para 5 años de recurrencia, 0.68 m, con calles aledañas que alcanzan los 3.55 m/s.

- (5) Av. de las Américas y el cruce del arroyo Mbotaby: como se observa en la Figura 7 (b) y (c), esta es una zona conflictiva por la combinación de los importantes caudales que escurren por los cordones de las avenidas y el frecuente desborde del arroyo. Sobre la avenida, en el punto más bajo, se alcanzan 0.56 m de agua para una recurrencia de 5 años, con tramos de la avenida que desarrollan velocidades cercanas a los 4 m/s de velocidad.
- (6) Av. J. D. Perón y el cruce del arroyo Mbotaby: esta avenida presenta varias zonas desbordadas por el agua. La misma se desarrolla al pie de una colina, recibiendo los excedentes de todos los barrios de viviendas sociales construidos en la ladera del cerro. El nivel máximo alcanzado es de 0.65 m para 5 años de recurrencia, con puntos de la avenida que alcanzan los 2.56 m/s. Para 100 años de recurrencia aquí es esperable el nivel máximo en una calle, con 1.24 m de altura. Cabe mencionar que dicha avenida no cuenta con cordones cunetas de hormigón y las cunetas excavadas en la tierra que posee

evidencia los importantes procesos de erosión que se desarrollan allí.

- (7) Av. Gendarmería Nacional y el cruce del arroyo Mbotaby: dicha avenida se encuentra actualmente en proceso de construcción de sus cordones cuneta de hormigón y un pavimento tipo empedrado brasileiro. La misma actúa como colector de los excedentes superficiales de todas las calles aledañas. Con la materialización del cordón, para 5 años de recurrencia, es esperable un nivel máximo de 0.62 m en la zona más baja y tramos de la avenida con velocidades superiores a los 4 m/s.

Las zonas descritas pueden visualizarse en la Figura 31. En la Tabla 10 se detallan los niveles y velocidades máximas alcanzadas en cada zona para los distintos períodos de recurrencia.

Tabla 9: Porcentajes de velocidades máximas en cunetas para las distintas recurrencias.

Velocidades máximas	Años de recurrencia		
	2	5	100
menos de 1 m/s	63.7%	59.4%	53.4%
de 1 a 2 m/s	31.5%	34.4%	35.7%
de 2 a 3 m/s	4.3%	5.5%	9.6%
de 3 a 4 m/s	0.5%	0.6%	1.2%
más de 4 m/s	0.0%	0.1%	0.2%

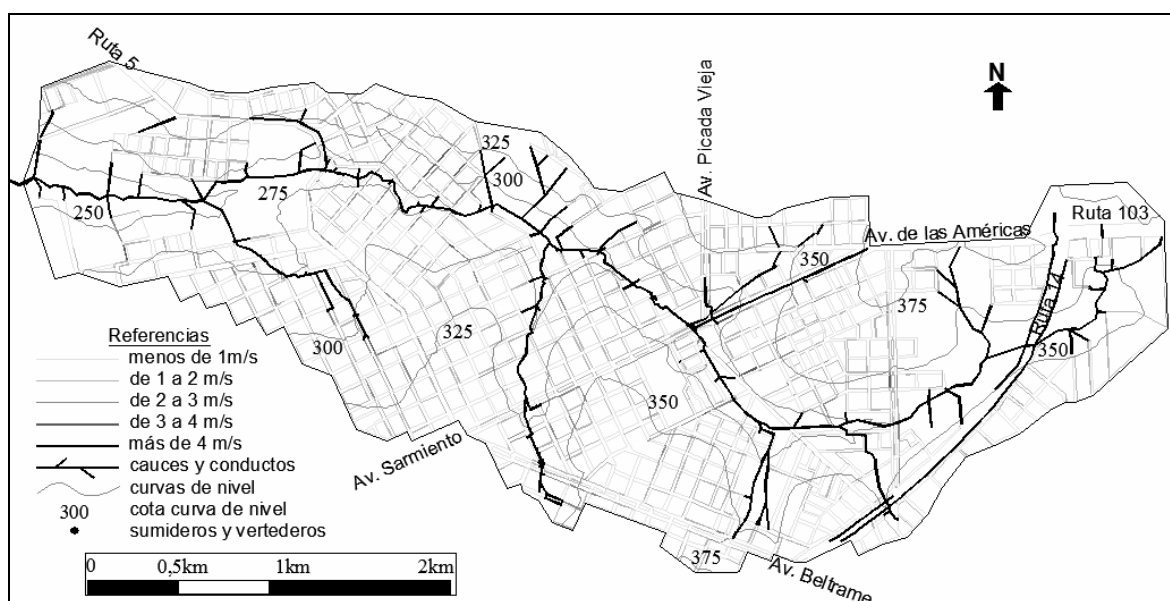


Figura 28. Velocidades máximas en cunetas para una tormenta de 12 hs de duración y 2 años de recurrencia.

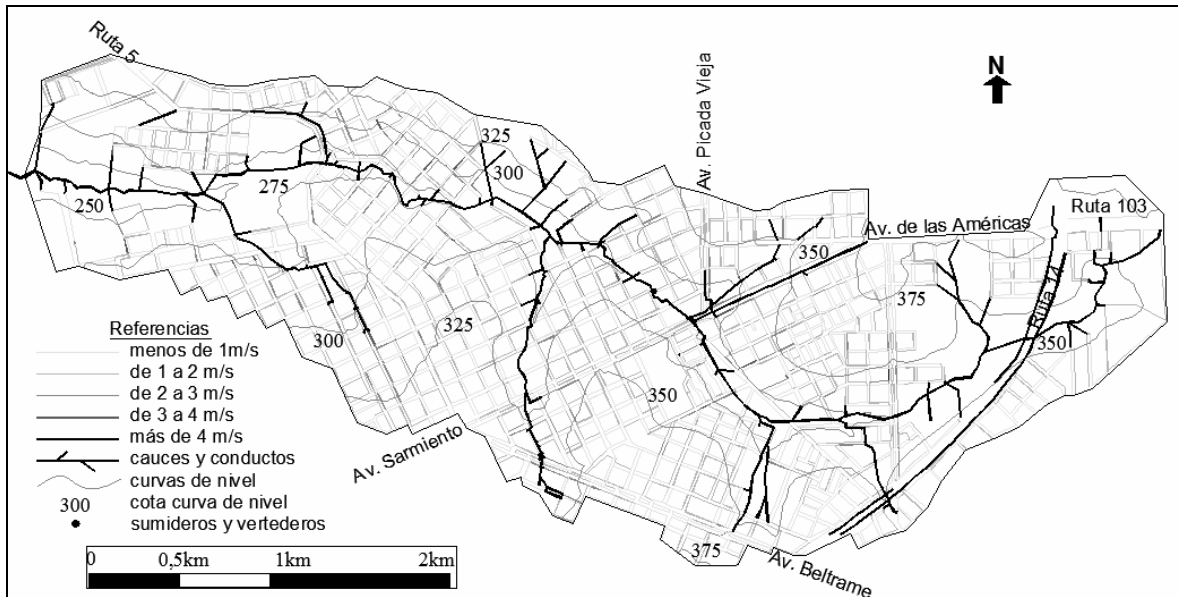


Figura 29. Velocidades máximas en cunetas para una tormenta de 12 hs de duración y 5 años de recurrencia.

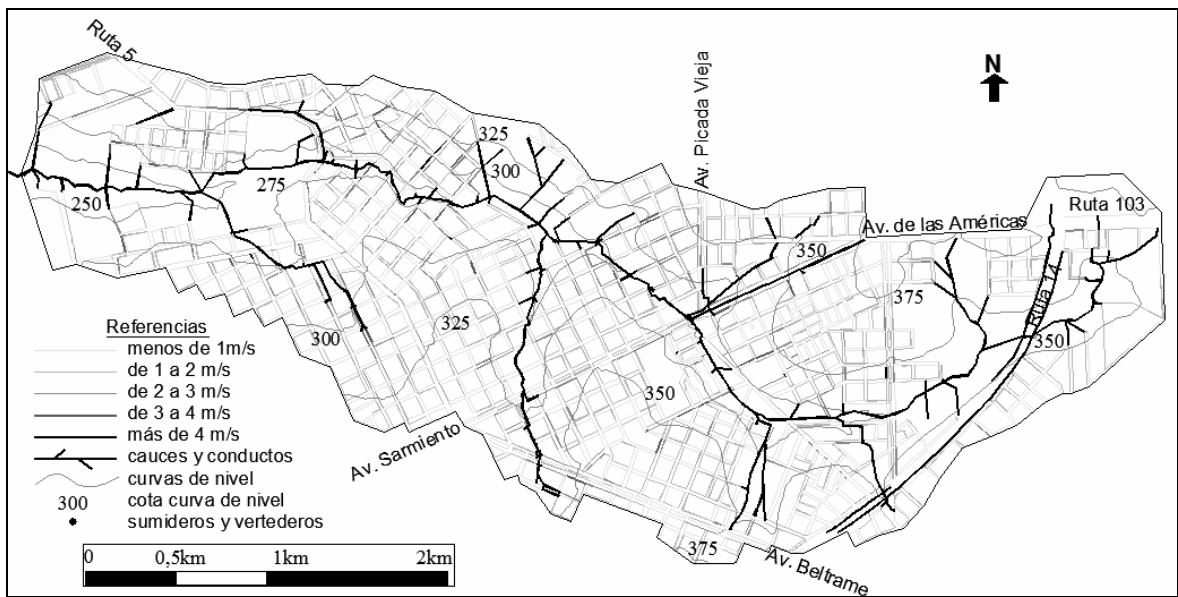


Figura 30. Velocidades máximas en cunetas para una tormenta de 12 hs de duración y 100 años de recurrencia.

Tabla 10: Resumen de niveles y velocidades máximas en las zonas más afectadas.

Zonas	Niveles máximos [m]			Velocidades máximas [m/s]		
	Años de recurrencia			Años de recurrencia		
	2	5	100	2	5	100
1	0.27	0.29	0.36	3.26	3.44	3.78
2	0.35	0.41	0.65	1.55	2.24	2.85
3	0.20	0.28	0.35	2.96	3.50	4.10
4	0.62	0.68	0.82	3.24	3.55	4.16
5	0.45	0.56	0.75	3.27	3.93	3.96
6	0.56	0.65	1.24	1.80	2.56	3.25
7	0.55	0.62	1.14	3.55	4.05	4.27

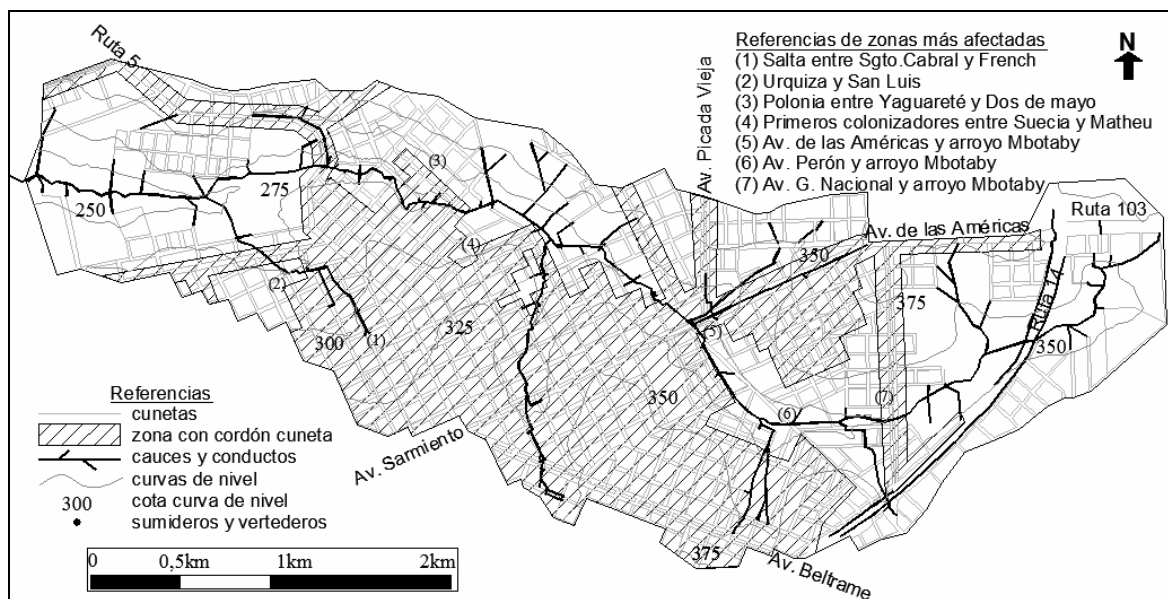


Figura 31. Mapa de zonas más afectadas por inundación de las calles de la cuenca Mbotaby.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como resultado de la modelación se han elaborado mapas de niveles y velocidades máximos para recurrencias de 2, 5 y 100 años.

Respecto a los niveles máximos calculados en las cunetas de las calles puede concluirse que para una recurrencia de 2 años, más del 25% de las cunetas se ven desbordadas afectando veredas y lotes, con niveles máximos que superan los 0.5 m de altura, representando una alta frecuencia de ocurrencia para esta recurrencia de lluvia. Para 5 años de recurrencia el porcentaje de cunetas desbordadas asciende al 43 %, con un 11.5 % de lotes afectados. Mientras que para 100 años de recurrencia, casi alcanzan el 50 % las cunetas desbordadas, con un 18.7 % de cunetas que afectan lotes con viviendas y comercios y valores máximos que superan el metro de altura.

En lo que concierne a velocidades, para una recurrencia de 2 años, el 36.3 % de las cunetas desarrollan velocidades mayores a 1 m/s, con valores máximos que superan los 3 m/s, lo que representa un alto riesgo de afectación por arrastre con una frecuencia muy alta. Para 5 años de recurrencia el porcentaje de cunetas con velocidades mayores a 1 m/s asciende a más del 40 %, con velocidades que superan los 4 m/s. En tanto que para 100 años de recurrencia, el 46.6 % de las cunetas presentan velocidades máximas superiores a 1 m/s.

El nivel máximo alcanzado en una cuneta para 2 años de recurrencia es de 0.62 m, en la Calle Primeros Colonizadores, mientras que la velocidad máxima es de 3.55 m/s en la av. Gendarmería Nacional. Para 5 años de recurrencia el nivel máximo alcanzado en la calle Pros. Colonizadores es de 0.68 m y la velocidad máxima es de 4.05 m/s en la Av. G. Nacional. El nivel máximo alcanzado para 100 años de recurrencia es de 1.24 m en la av. J. D. Perón y la velocidad máxima alcanzó los 4.27 m/s en la Av. G. Nacional.

Dentro de la zona con cordones cunetas de hormigón, son escasas las cunetas desbordadas para 2 y 5 años de recurrencia, lo que minimiza la inundación de las veredas. Aunque se observan algunas en cercanías de los arroyos, lugar donde se ubican las bocas de tormenta y vertederos que derivan los caudales hacia los arroyos.

Se han detectado calles, actualmente materializadas de tierra, que alcanzan a desarrollar grandes velocidades, velocidades que se acrecentarán ante la construcción de los cordones cuneta de hormigón, con la necesidad de evaluar el cambio en la dinámica del escurrimiento y como afectará este a las calles y cauces receptores de los caudales.

Las zonas de mayor afectación por inundación de calles detectadas son 7. Todas ellas presentan características similares, con calles de elevada pendiente, que recogen los excedentes superficiales

de las calles aledañas, alcanzando una zona de menor pendiente en cercanía de los arroyos.

CONCLUSIONES

La evidencia física comprobada durante eventos lluviosos acerca de paulatinos aumentos de niveles de agua en calle, velocidades y caudales, como así también de procesos erosivos asociados, en cuencas con la dinámica hídrica como la estudiada, indica la necesidad de analizar detalladamente los mecanismos del escurrimiento superficial en estas cuencas cuando, históricamente, no han sido objeto de estudio prioritario, por poseer una aparente gran capacidad de producir pérdidas al escurrimiento y un sistema natural de concentración y erogación de los excedentes hídricos superficiales

A los efectos de establecer una evaluación de riesgo de inundación en un ambiente físico urbano donde convergen precipitaciones de elevados módulos pluviométricos y pendientes topográficas elevadas, se ha llevado a cabo el desarrollo y aplicación de una metodología basada en la simulación hidrológica-hidráulica de escurrimiento a superficie libre.

Para describir el escurrimiento fue necesario un modelo que permita una constitución con alto nivel de detalle, debido a la gran influencia que poseen las pendientes de las calles en la dinámica del escurrimiento superficial. El modelo SWMM 5.0vE utilizado para la modelación ha mostrado un comportamiento satisfactorio para modelar este tipo de escenarios. Se ha logrado constituir el modelo con una densidad de 7.9 elementos/ Has.

Se comprueba que en cuencas como la de estudio, la evaluación por riesgos de inundación no está dictada por la combinación de niveles de agua alcanzados y su permanencia, dado que la topografía facilita la salida de los caudales permitiendo el pronto retorno de los evacuados a sus viviendas. Tal evaluación se rige por la combinación de niveles y velocidades alcanzados simultáneamente, situación que facilita el arrastre de personas y animales, como la destrucción parcial de vehículos y construcciones.

Se ha objetivado detallar los niveles y velocidades máximas desarrolladas en las calles de la cuenca, no así los alcanzados en los otros elementos del sistema, como conductos y cursos de agua. Además, se realizó la modelación sin contemplar posibles

alternativas de pérdidas de rendimiento hidráulico de sumideros y conductos por obstrucción y acumulación de basura.

Para futuras investigaciones se recomienda, ampliar el análisis de la modelación efectuada y evaluar los niveles y velocidades máximas alcanzadas en los cauces receptores de los excedentes superficiales, dada la gran cantidad de población que habita en los valles de inundación de los mismos. Como así también estudiar la capacidad de conducción del actual sistema de sumideros y conductos, y su disminución de capacidad de evacuación por obstrucción debido a la acumulación de basura.

Para finalizar, si bien la zona céntrica de la ciudad presenta un alto grado de impermeabilidad (85 %), el total de aéreas impermeables de la cuenca es de solo 24.5 %, lo que favorece la adopción de medidas estructurales y, sobretodo, no estructurales, para controlar y mitigar los impactos por inundación. Necesitándose para ello continuar las investigaciones acerca de la respuesta actual del sistema y su comportamiento ante posibles escenarios futuros.

REFERENCIAS

- C.A.R.T.A. 1962. Compañía argentina de relevamiento topográfico y aerofotogramétrico, Hoja 2754-25-2D3. Buenos Aires.
- Depettris C., Rohrmann H. y Ruberto A. 2011. *Estudio de la hidrología urbana del nordeste argentino*. Ed. Hanne. Salta. 246p.
- 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.
- Grupo Multidisciplinar de Modelación de Flujo (GMMF). 2005. Manual del usuario del SWMM 5.0 vE. Universidad Politécnica de Valencia. 244p.
- Huk J. y Mercanti J. 1999. Medidas estructurales y no estructurales de control hidrológico aplicadas a una cuenca urbana de la ciudad de Posadas, Misiones (Argentina). Trabajo final del Curso de posgrado en hidrología urbana, Facultad de ingeniería, UNNE, Resistencia, Chaco. 20p.
- INTA Cerro Azul. 2013. Comunicación Interna.
- 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.
- 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.
- Primera edición web 2012. Oberá: bajo el caudal de los arroyos y los evacuados pudieron volver a sus hogares. Acceso on-line 25 de septiembre de 2013. http://www.primera_edicionweb.com.ar/nota/digital/65595.
- Reinert H. 2007. *Caracterización geotécnica de suelos grises del departamento de Oberá – Misiones*. Tesis de maestría. FCEFYN-UNC. Córdoba. 293p.
- Ruberto A., Gabaza S., Aquino C. y Bogliotti E. 2011. Variación de la impermeabilidad en una cuenca urbana de llanura y su impacto en el escurrimiento superficial. CD actas CONAGUA 2011. Resistencia, Chaco. 17p.
- Riccardi G. 2004. *Hidrología en medios antropizados*. Libro electrónico. CURIHAM, FCEIA-UNR. <http://c-virtual.fceia.unr.edu.ar>.
- Riccardi G., Basile P., Zimmermann E., Stenta H., Scuderi C., Rentería J. y García M. 2008. *Modelación de procesos hidrológicos asociados al escurrimiento superficial en áreas de llanura*. UNR Editora, Rosario.
- Rodríguez 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.
- Rodríguez 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 (SRTM), NASA.
- U.S. Soil Conservation Service. 1975. Urban hydrology for small watersheds, *Technical release No. 55, SCS-USDA*, Washington, D.C.
- Artículo recibido el 02/2014 y aprobado para su publicación el 12/2014.*