

# **CAPÍTULO 2: INUNDACIÓN URBANA DE LA CIUDAD DE LA PLATA EN ABRIL DE 2013 RIESGO HÍDRICO POR INUNDACIÓN – MAPAS DE PELIGROSIDAD**

*Ing. José Luis Carner, Ing. Sergio O. Liscia*

*Ing. Facundo Ortiz, Ing. Ezequiel Lacava, Ing. Esteban Lacunza, Ing. Marcos Cipponeri,  
Guillermo Larrivey*

UIDET Hidromecánica – Departamento de Hidráulica – Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de La Plata – Argentina. [jlcarner@gmail.com](mailto:jlcarner@gmail.com) [soliscia1@gmail.com](mailto:soliscia1@gmail.com)

## **RESUMEN**

El Riesgo de Inundaciones debe ser gestionado de manera eficiente pretendiendo minimizar los costos en inversiones en Medidas Estructurales mejorando la adopción y eficiencia de Medidas No Estructurales, tales como los planes de Ordenamiento Urbano. Existen normativas europeas que permitirían cuantificar los riesgos para abordar los planes de emergencias y contingencias dentro de la ciudad, atendiendo a todo un espectro de lluvias de recurrencias variadas inclusive hasta la Precipitación Máxima Probable.

## **INTRODUCCIÓN**

El Dr. Dardo Rocha fue investido como Gobernador de la Provincia, el 1 de Mayo de 1881, y mencionó en su discurso: "Debemos esperar que en un breve tiempo levantemos una ciudad populosa y floreciente que, para las necesidades administrativas y políticas, reemplace en cuanto sea posible, a la antigua capital". Y se promulga la Ley de creación de la ciudad de LA PLATA en los "Altos de la Ensenada". Era preciso fundar una ciudad desde sus cimientos, porque el sitio no era otra cosa que montes, lomas y bañados, recorridos por liebres, perdices y vizcachas, que servían de pastoreo a las haciendas de las estancias cercanas...

Los eventos pluviales ocurridos en la ciudad de La Plata, Provincia de Buenos Aires - Argentina, entre los días 2 y 3 de Abril de 2013 provocaron una inundación de características catastróficas con la consecuencia de 89 víctimas fatales. Se pretende en este trabajo interpretar el fenómeno, de 392,2 mm de agua caídos durante el día 2 de abril, concentrando su mayor intensidad de 225 mm en sólo 2 horas. Y esta precipitación caída sobre el paisaje anteriormente mencionado por el Dr. Dardo Rocha, 131 años después, con la evolución dinámica de la ciudad.

Las consecuencias directas quedaron relacionadas con áreas inundables de gran magnitud dentro del casco urbano (vinculado a la geomorfología), en una cuenca urbana de muy corto tiempo de concentración y con un registro de lluvia sin precedentes para la ciudad (vinculado a la hidrología y meteorología). Otros efectos fueron causados por la ausencia en la Gestión del Riesgo, la ausencia de Planes de Contingencias y Planes de emergencias y un dramático problema de comunicación a la población (vinculado al riesgo de fenómenos extremos vinculados a la Defensa Civil).

El primer punto de abordaje del tema, recae en reconsiderar los criterios de diseño de los desagües pluviales, empezando por las medidas No Estructurales y concluyendo en las Medidas Estructurales.

La ciudad de La Plata requería, desde hacía tiempo, de una adecuación en la red de drenaje pluvial varias veces advertida por diversos investigadores y trabajos realizados. El crecimiento urbano en las últimas décadas, tanto en superficie urbana como en impermeabilización, hicieron que el paso del tiempo tornase inadecuada la red pluvial existente. Aun así, un evento como el que se estudia, es imposible de gestionar mediante una red de drenaje.

A partir del suceso del 2013 se comenzaron trabajos de ampliación del cauce receptor principal de gran parte de la cuenca urbana de la ciudad, A° del Gato, aumentando su capacidad de

erogación para recurrencias del orden de los 5 años según las Memorias Técnicas de los pliegos de licitación.

## OBJETIVO

El objetivo de los trabajos aquí elaborados consiste en plantear un punto de inflexión en los diseños de obras en virtud del objetivo a cumplir, y cambiar el criterio de diseño de proyectos de Obras Estructurales, consistentes en pretender minimizar las “manchas de inundación” provocadas por precipitaciones de diversas recurrencias (como las obras de infraestructura de saneamiento pluvial), empezando este cambio en atender, en primer lugar, el Riesgo por Inundación inherente a la cuenca urbana y contrastarlo con la vulnerabilidad de la población y de las viviendas directamente afectadas.

Una vez conocido y determinado el Riesgo Potencial por Daños de Inundación, para lo que se propone adoptar una recurrencia de 100 años como meta o Imagen Objetivo sobre la que se debería basar la planificación hídrica dentro del Ordenamiento Territorial de la ciudad, y se analizarán los comportamientos de las Medidas Estructurales y No Estructurales en busca de minimizar, en la vida cotidiana de la ciudad, los efectos y problemas asociados a lluvias de recurrencias bajas ( $R=2$  años a 10 años) que son las de proyecto y diseño de obras, y para recurrencias altas ( $R=100$  años hasta la PMP), se deberían encarar los estudios necesarios, para evitar consecuencias críticas, asociadas a la peligrosidad del territorio y la vulnerabilidad del mismo, desde estudios de ingeniería hasta la gestión de las emergencias y contingencias. Este enfoque debería poner énfasis en las consecuencias del diseño de obras estructurales que sólo atienden a evitar agua en forma superficial y las necesidades de disminuir a un mínimo aceptable, el Riesgo de Inundación y la Peligrosidad.



**Figura 1:** Plano de la ciudad de La Plata hacia 1905 donde se destacan los cauces “permanentes”

## **METODOLOGÍA**

La metodología implementada en el trabajo consiste en representar al fenómeno natural que generan las inundaciones sobre las calles de la ciudad, producto de tormentas correspondientes a todo el rango de recurrencias aplicable a la ciudad de La Plata, desde recurrencias de 2 años hasta la correspondiente a 100 años y aplicar adicionalmente la Precipitación Máxima Probable. Todas estas precipitaciones generarán sobre la cuenca urbana escurrimientos a través de conductos y en calles permitiendo que las aguas lleguen a los emisarios finales.

Los escurrimientos en conductos son deseables mientras que los escurrimientos en calles, en virtud de los niveles y velocidades alcanzados en cada evento estudiado, generan problemas que se pretende sean minimizados.

Modelando y simulando lluvias que van aumentando la intensidad y la cantidad de agua precipitada, se podrá observar que la ciudad muestra encharcamientos crecientes, aumento en las limitaciones a la infiltración y circulación de las aguas excedentes a través de calles y veredas, pudiendo ocurrir, en varios de los escenarios modelados, el ingreso de agua en viviendas.

Como resultado de dichas modelaciones se han determinado las manchas de inundación, mejor denominadas como áreas inundables, para todo el rango de recurrencias estudiado; y para la Imagen Objetivo de Recurrencia 100 años, se han determinado y puesto sobre mapas, las profundidades de agua sobre calles (como parte de indicadores de Peligrosidad de la cuenca urbana) para rangos de 0,30 m, 0,50 m, 0,85 m y 1,20 m, pretendiendo seguir los lineamientos adoptados por la Directiva 2007/60 de la CE sobre Riesgo de Crecidas y su extensión, así como las áreas afectadas por la misma. Haremos una adaptación de la norma con una impronta particularmente en la ciudad. De esta forma, podrán especificarse las medidas más adecuadas para cada área y coordinarlas entre sí para reducir el riesgo asociado. En España, esta metodología se transpuso en el Real Decreto 903/2010, de “Evaluación y Gestión de los Riesgos de Inundación”.

Con este fin se elaboran los mapas de Riesgo de Inundación. Para la confección de dichos mapas se analiza: 1.- la componente física de la cuenca, determinando los mapas de peligrosidad, y 2.- la componente humana, determinando los mapas de vulnerabilidad (Lluís Masgrau, 2004). El Departamento de Hidráulica a través de la Unidad de Investigación Hidromecánica aborda el punto 1.

### **Modelación numérica**

La elaboración de los mapas de riesgo de inundación son los resultantes de una serie de resultados directos e indirectos de modelos matemáticos aplicados sobre la superficie de la cuenca urbana de la ciudad incluyendo barrios semiurbanos o zonas de extra radios. La idea es recabar los máximos niveles posibles de inundación realizando una envolvente al total de máximos, no necesariamente simultáneos, sobre cada una de las calles y esquinas de la cuenca urbana. También se relevan datos de caudales y en forma indirecta de velocidades medias del agua en calles.

Se aplicó una modelación de la cuenca y el sistema de redes de saneamiento pluvial con el modelo matemático Storm Water Management Model (SWMM), desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU., donde se trazaron las sub cuencas de aporte a cada esquina o cruce de calles (nodos de la red mayor) y se simuló el escurrimiento por calles según sus propias pendientes. La partición del escurrimiento conlleva consideraciones energéticas.

Cuando el agua que escurre encuentra imbornales, sumideros o bocas de tormenta (también vertederos longitudinales), se produce el vínculo entre la red mayor y la red menor, materializada por todas las conducciones existentes en la ciudad, y este vínculo queda materializado por vertederos longitudinales (weirs) que representan las capacidades de transferencia de agua de una red a otra, y en caso de quedar superada la capacidad de los vertederos (sumideros) o no disponer de capacidad las conducciones, el escurrimiento continuará, en parte o totalmente, por calles hacia nodos de menor energía potencial.

Las lluvias sintéticas modeladas fueron adoptadas con duraciones de 3 horas, que corresponde al tiempo máximo de concentración de la cuenca urbana, y posteriormente se modeló la lluvia ocurrida el día 2 de Abril de 2013 cuyas consecuencias, marcas de agua y niveles alcanzados fueron relevadas por diferentes interesados en el tema. En el caso de la Precipitación Máxima Probable se adoptó la correspondiente a una duración de 24 hs para que resulte superadora de la ocurrida el día 2 de Abril de 2013, para esa duración.

El reporte que genera el software utilizado, permite trabajar en un post procesamiento con las máximas alturas de agua en cada nodo y para cada escenario planteado, permitiendo representar la envolvente de los máximos niveles de las aguas. También reporta caudales y velocidades máximas en nodos (esquinas) y links (calles) con lo cual se pueden elaborar otros productos para generar los mapas de Peligrosidad (áreas inundables, profundidades, velocidades, etc.).

Para cada una de las sub cuencas se determinaron las áreas, pendientes, porcentajes impermeables, destino de las aguas, y otros parámetros característicos solicitados por el modelo SWMM; del mismo modo se representaron todas las conducciones existentes, con sus dimensiones, pendientes y características del vertido. Y para considerar la distribución de la lluvia no uniforme en el evento del 2 de Abril se modelaron distintas lluvias aplicadas sobre la cuenca completa a través de la selección de pluviógrafos, cada uno con sus propios registros y de acuerdo a observaciones particulares.

Sobre este modelo se realizó la modelación del sistema dual tanto de la red mayor (calles y avenidas) como de la red menor (conducciones pluviales), considerando además el posible almacenamiento en manzanas cuando los niveles de agua en las calles permite el ingreso del agua a las propiedades y viviendas en general.

Luego de los procesos de calibración y validación de los modelos, se determinaron los máximos niveles alcanzados por el agua en cada nodo (cruce de calles) y se adoptaron como áreas inundables aquellas superficies (máximas) alcanzadas por las aguas.

### Otros Indicadores de Peligrosidad

Los indicadores que se han utilizado en este trabajo son fundamentalmente los niveles de agua en calles, las velocidades en las mismas, determinadas en forma indirecta, los tiempos de permanencia para una altura de agua determinada, para verificar la eficiencia de las obras que su puedan proponer, y otros indicadores que se menciona en diversas publicaciones como es la Intensidad de Sumersión.

La Intensidad de Sumersión [Malinow, Guillermo, 2005], representa el producto de la velocidad de la corriente media del agua por la profundidad.

$$I[m^2 / s] = V[m / s] * h[m] \quad [1]$$

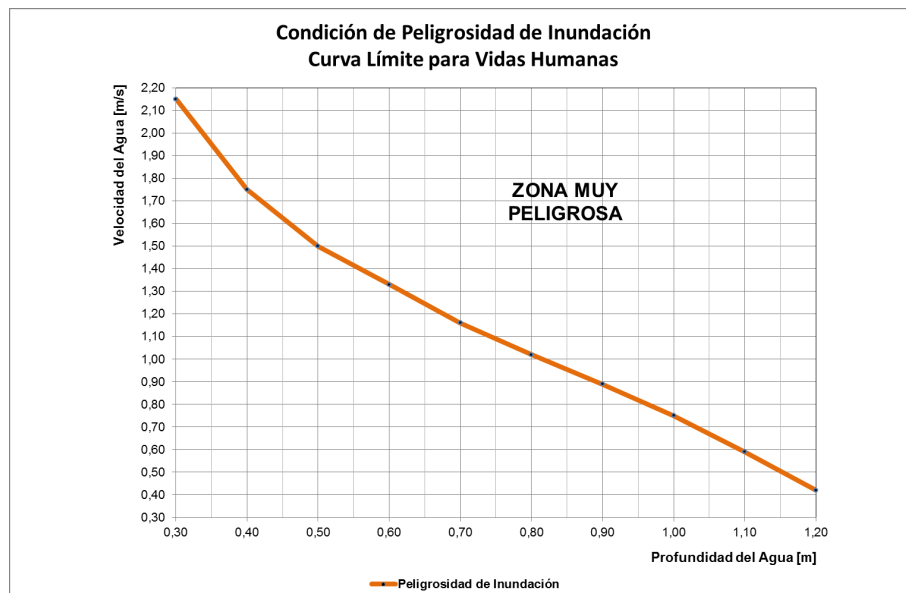


Figura 2: Índice de Sumersión

En España se ha adoptado un parámetro similar denominado Índice de Peligrosidad HR (Hazard Risk), [Real Decreto 903/2010], que tiene en cuenta, además, el flujo o escorrentía de escombros, DF, valor que varía de 0 a 1.

$$HR = h[m] * (V[m/s] + 0,5) + DF \quad [2]$$

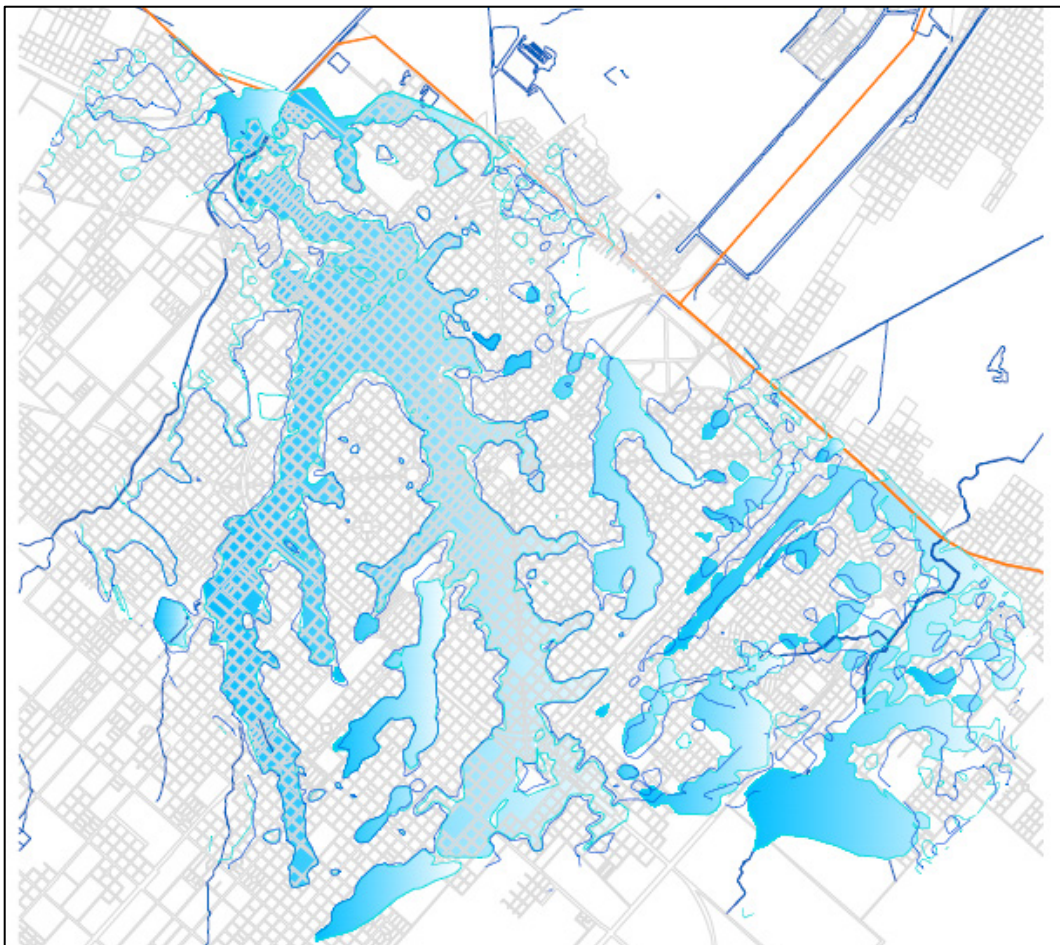
El uso de este indicador permite estimar la cantidad de heridos y muertos en función de la vulnerabilidad de la zona, la prevención y alertas implementados, el tipo de construcciones, y permite evaluar el daño susceptible de producirse en caso de una crecida de determinada probabilidad.

### Resultados

En las figura 3 y 4 se muestran mapas de áreas inundables: para la lluvia ocurrida el día 2 de Abril de 2013, y sobre el mismo el área correspondiente a la Recurrencia de 100 años en la figura 3; en la figura 4 se muestra, en forma de áreas crecientes, las áreas inundables para el rango de lluvias estudiadas. Las áreas inundables correspondiente a R=100 años y la correspondiente al 2 de Abril de 2013 resultan muy semejantes.

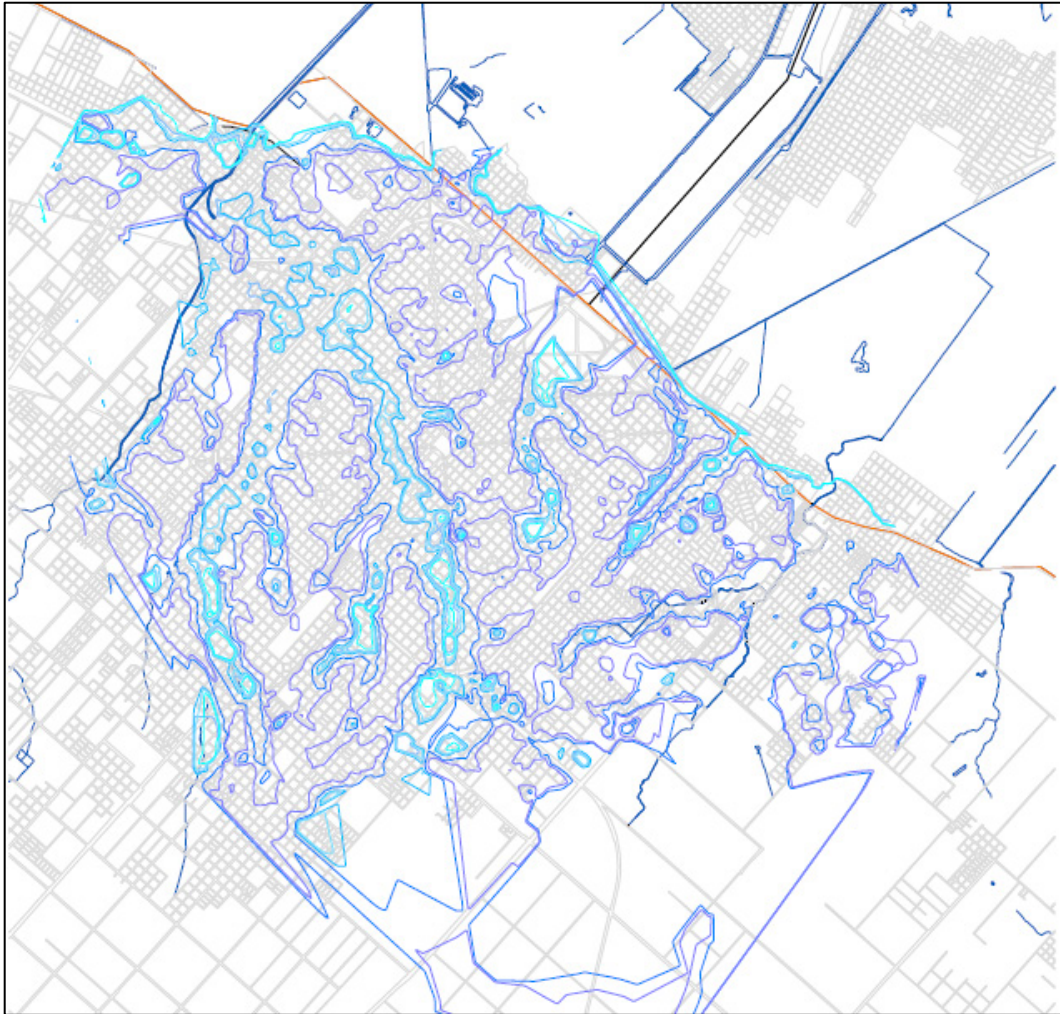
Una gran parte del casco urbano de la ciudad resulta susceptible de inundarse para eventos de recurrencias resultantes por encima de los 50 años. Por tal motivo, se desprende que este mapa brinda poca información dado que no discrimina sobre las profundidades alcanzadas por el agua (todas las calles y veredas anegadas a partir de profundidades mayores a 0,30 m medidas desde el eje de calle), y tampoco discrimina sobre el tiempo de permanencia de las aguas pudiendo varias desde unos pocos minutos hasta varias horas. Pero es un fiel reflejo de la *envolvente* de las máximas afectaciones ocurridas.

Visto de otro modo, pareciera que la ciudad está muy afectada en todas sus zonas habitables, y no es rigurosamente así para todas las calles con la misma peligrosidad. Por lo tanto hay que discriminar entre las zonas susceptibles de “mojarse” y lo realmente anegable con grados de peligrosidad.



**Figura 3.-** Mapa de Áreas Inundables sobre el plano de la ciudad de La Plata para la recurrencia de R= 100 años y para el evento pluvial del día 2 de Abril de 2013.

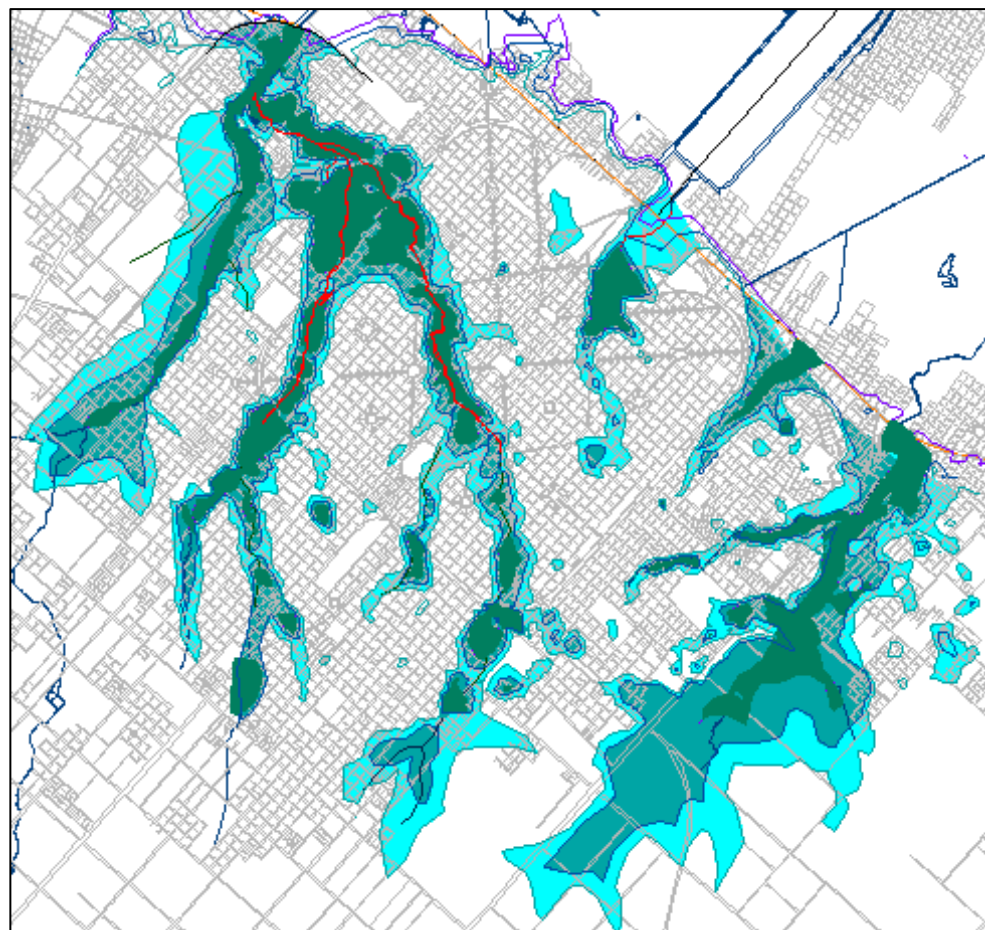
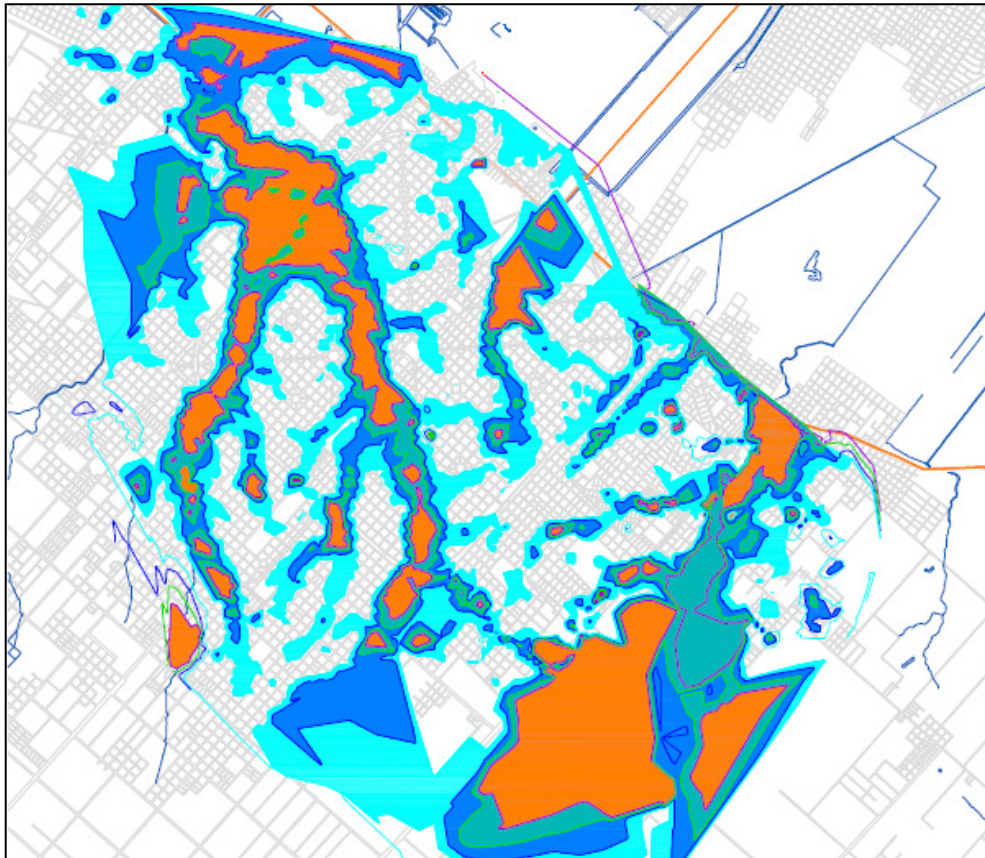
En la Figura 4 se muestran las áreas inundables ( $h = 0.30$  m sobre calles) para todo el rango de lluvias analizado.



**Figura 4.-** Mapa de Manchas de Inundación para las Recurrencias de 2, 5, 10, 20, 50, 100 años y PMP

En la Figura 5 se discriminan las diferentes profundidades que alcanzó el agua en diferentes zonas de la ciudad y para dos eventos distintos. En el primero de estos mapas se representan en forma cualitativa el fenómeno ocurrido el día 2 de Abril de 2013 y lo esperable para otras recurrencias. En el segundo de estos mapas, correspondiente a la Recurrencias de 100 años, los mismos niveles alcanzados por el agua, medidos desde el eje de la calle.

Las profundidades indicadas en cada plano corresponden a 0,30 m, 0,75m, 1,20m, y se han discriminado profundidades mayores a 2,00 m. Estos valores corresponden a estándares generales de valoración. A partir de éstos valores existen metodologías para el análisis de la vulnerabilidad.

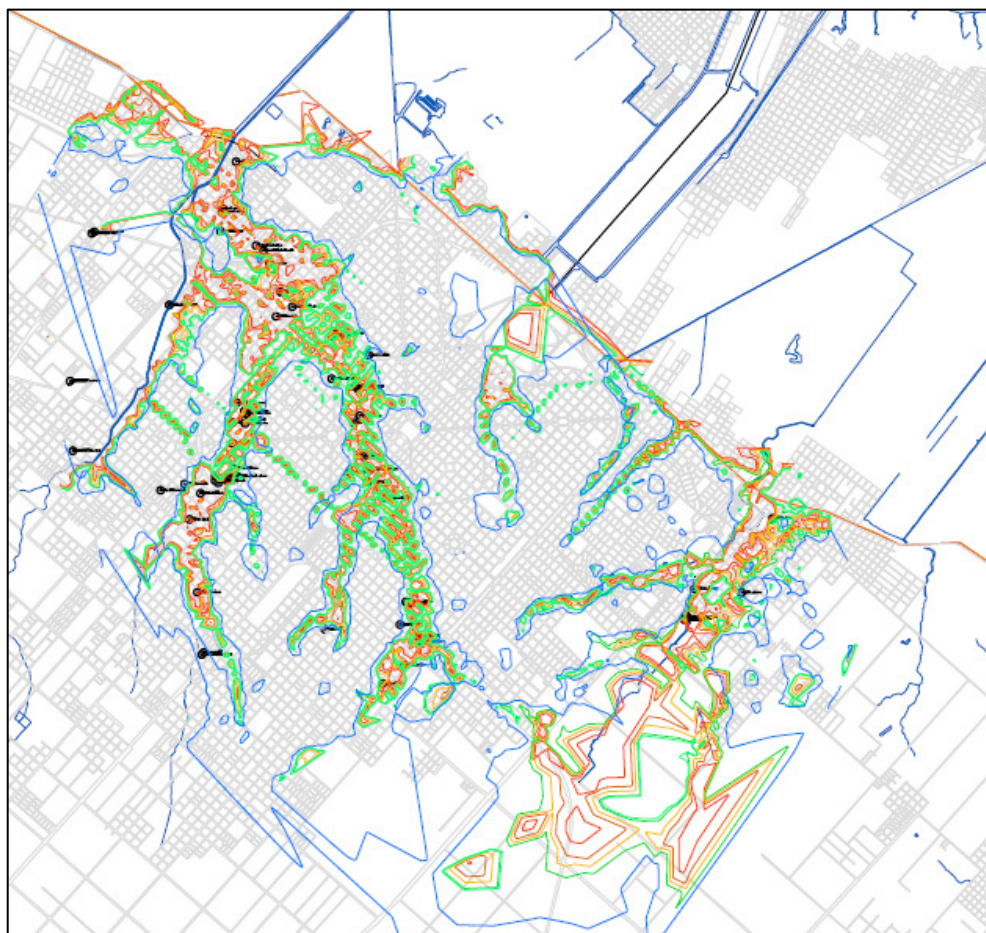


**Figura 5.-** Mapa de Profundidades sobre el plano de la ciudad de La Plata para el evento del 2 de Abril de 2013 y para R= 100 años

Si bien los modelos de extrapolación se ajustan en mayor o menor medida a la máxima envolvente de los eventos, como ser las profundidades alcanzadas por el agua, aun así no son suficientes para determinar la real peligrosidad de la cuenca.

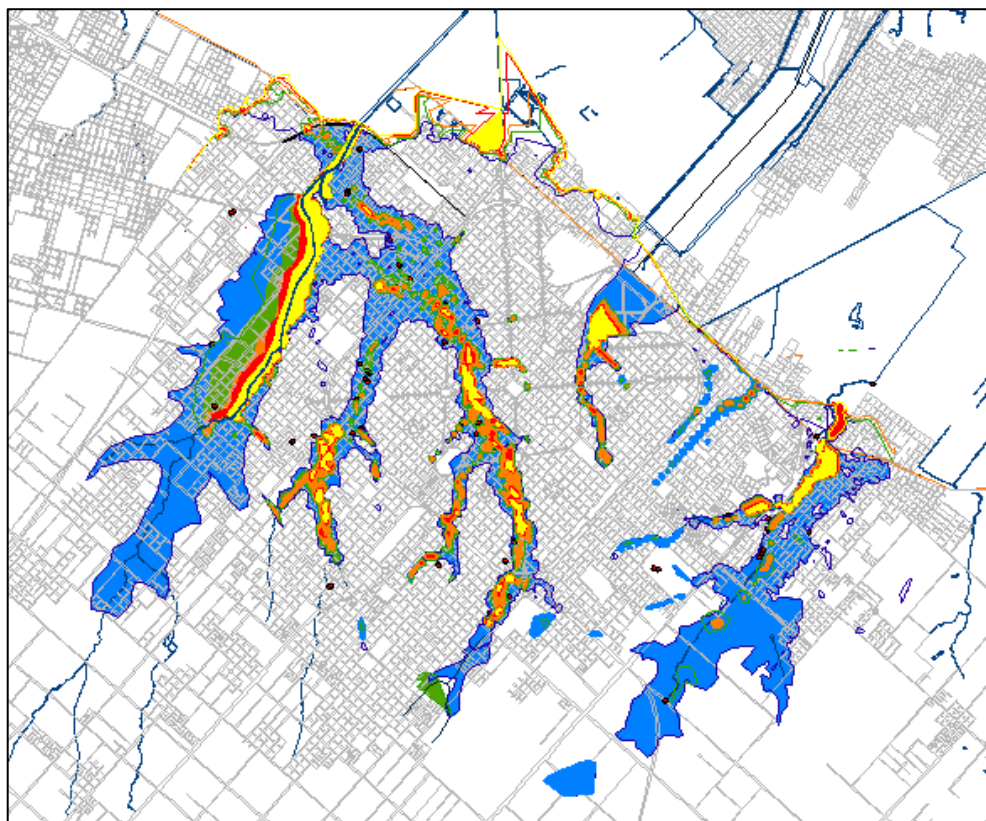
En este sentido se avanza hacia otros indicadores ya mencionados, obteniendo el mapa de la figura 6. El mismo mapa fue elaborado para la Recurrencia de 100 años y se presenta en la Figura 7.

La comparación de ambos eventos determina la peligrosidad asociada a las frecuencias de ocurrencia de cada uno de ellos.



**Figura 6.-** Mapa de Áreas Inundables sobre el plano de la ciudad de La Plata, con Intensidades de sumersión  $I= 0,35 \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $I= 0,40 \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $I= 0,60 \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $I=0,80 \text{ m}^2/\text{s}$  e  $I=1,20\text{m}^2/\text{s}$ . Los puntos indicados representan las víctimas producto del evento del 2 de Abril de 2013





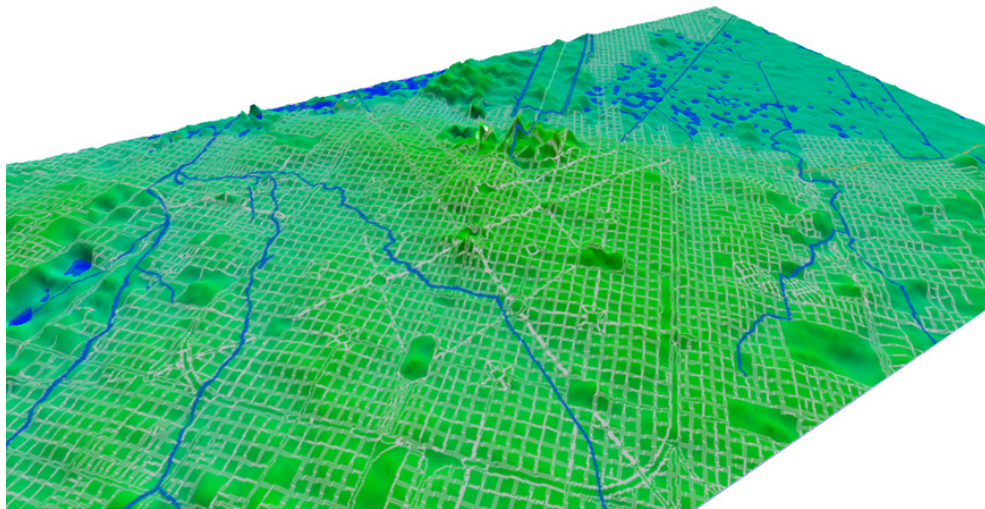
**Figura 7.-** Mapa de Intensidades de Sumersión correspondientes a Recurrencia R= 100 años, sobre el área de inundación, semejantes a la Figura 6

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Mucha de la bibliografía encontrada menciona valores críticos de la Intensidad de Sumersión a partir del valor  $0,40 \text{ m}^2/\text{s}$  correspondiente a zonas urbanas. Sin embargo los muertos relevados en primera instancia en expediente judicial, indicarían, si las razones de los decesos se produjeron por arrastre (dentro o fuera de vehículos) y/o por asfixia por sumersión, en la vía pública, que los valores críticos para la ciudad de La Plata son aún menores al  $0,40$  indicado, pudiendo ser del orden de  $I=0,35 \text{ m}^2/\text{s}$ , para valores medios de velocidades en calles.

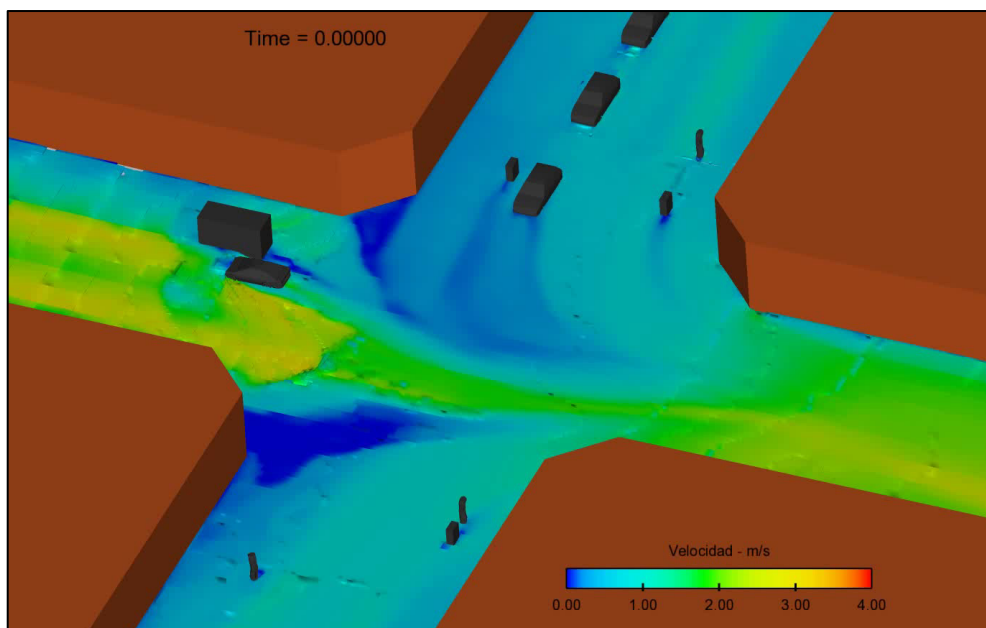
Estos resultados deben ser analizados a la luz del cálculo realizado, partiendo de la base que los caudales y las velocidades son considerados como *valores medios en todo el ancho y longitud de la calle*. Este resultado se aparta de la realidad, especialmente en calles trazadas sobre los cauces originales y que se activan con grandes precipitaciones. Los excedentes pluviales que no pueden escurrir a través del sistema menor de la red de saneamiento pluvial lo hace (y lo seguirá haciendo en cada evento) siguiendo la geomorfología y pendientes del terreno, concentrando los escurrimientos en los puntos bajos, buscando el cauce original, ahora alterado por el trazado del ejido urbano. Es un balance de energía.

En la figura 8 se presenta una imagen del plano de la ciudad, original, con la traza original de dichos cauces, hoy desdibujados del terreno.



**Figura 8.** Perspectiva del casco urbano con la traza original de los conductos, con cauces permanentes y semipermanentes

La concentración de líneas de corriente se adapta o condiciona a los obstáculos existentes en la red mayor formada por calles (mobiliario urbano, autos estacionados, etc.) quedando concentraciones como la que se muestra en la Figura 9. Esta figura es el resultado de una modelación matemática realizada en forma parcial con un software específico CFD (Computational Fluid Dynamics) sobre una esquina particular de la ciudad, donde los datos de entrada fueron los caudales medios en esquinas y calles resultantes del otro tipo de modelaciones matemáticas como fue el SWMM; se analizó y estudió la modificación del escurrimiento en cercanías de obstáculos como son quioscos de revistas y autos estacionados. La Figura 10 muestra una imagen fotográfica captada en la misma esquina.

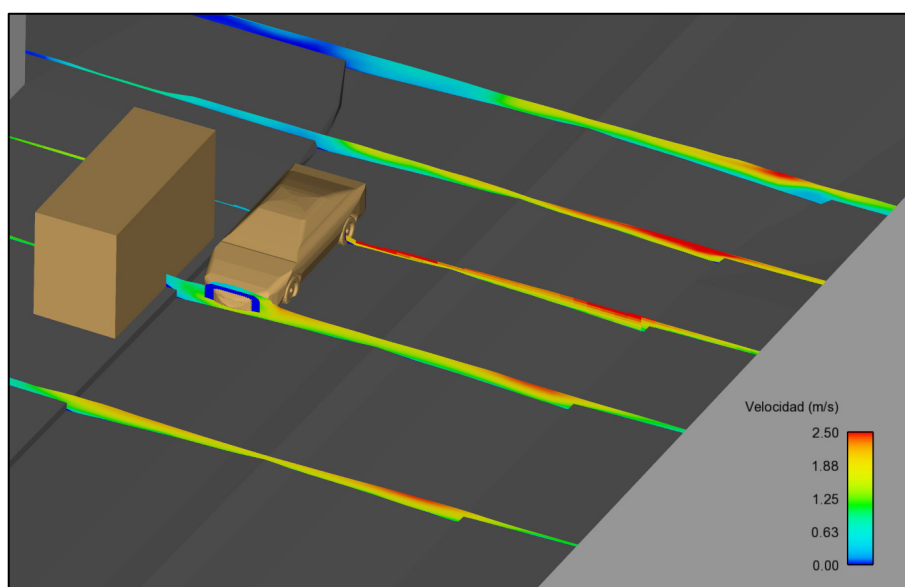


**Figura 9.-** Alteraciones en los escurrimientos de velocidades medias concentrando la líneas de corriente hacia una de las cunetas por causas de los obstáculos al escurrimiento. La escala cromática de velocidades varía desde velocidades nulas (azul) hasta velocidades máximas (naranja – rojo).



**Figura 10.-** Se observan ondulaciones superficiales del agua en correspondencia con cunetas, de variadas intensidades y flotación de autos. Los escurrimientos quedan muy apartados de los valores “medios”

En la Figura 11 se puede observar la distribución de velocidades determinada por los obstáculos modelados. La red mayor está considerada entre “Líneas Municipales”, incluyendo veredas y calles.



**Figura 11.-** Distribución de velocidades asimétrica en concordancia con los cordones cuneta de calles donde se modelan obstáculos fijos y/o móviles

No es sólo el mobiliario urbano el que modifica las condiciones de escurrimiento y altera indicadores de Peligrosidad de la cuenca. Otro tipo de obras de infraestructura como son las rutas, puentes y alcantarillas también generan modificaciones en el escurrimiento, especialmente para eventos de gran magnitud y baja frecuencia, en especial cuando las aguas ocupan los valles y planicies naturales de inundación. Tal es el caso del puente ubicado en el Camino General Belgrano (Figura 12) y 526. El escurrimiento natural de desborde se ve totalmente alterado al obstruir el paso del agua bajo el puente. El cauce original fue reemplazado por conducciones, pero la topografía general conduce los escurrimientos excedentes hacia estos puntos bajos, en relación con el entorno. La ruta presenta un alteo sobre la topografía original de la zona para permitir la construcción del puente metálico.



**Figura 12.-** Obstrucción del escurrimiento natural bajo el puente

En el caso del terraplén ferroviario sobre el cauce principal del A° del Gato, se anuló el escurrimiento natural en las planicies de inundación a causa de la ejecución de este terraplén ferroviario. El efecto es la generación del cambio de escurrimiento con la formación de curvas de remanso que aumentan la altura alcanzada por las aguas en la zona de influencia.

## **CONCLUSIONES**

Los “Mapas de Peligrosidad” quedan mejor representados a través de indicadores como la Intensidad de Sumersión sobre otro tipo de indicadores, complementando en forma eficiente al “Mapa de Áreas Inundables”. En las figuras 3, 4, 5 y 6 se ha superpuesto la trama urbana que daría idea de la Vulnerabilidad de personas y/o viviendas expuestas a fenómenos de riesgos potenciales de inundación, para distintos eventos posibles (de variada probabilidad).

De acuerdo a los radios censales de población, correspondientes al Censo de Población y Viviendas del año 2010, la población afectada (debajo de las áreas inundables) fue de 205.390 personas, de las cuales el 18,84% es más vulnerable por ser personas menores de 5 años o mayores de 65 años. Y de acuerdo a datos del mismo censo, en el orden de 62.240 viviendas fueron susceptibles de quedar afectadas en mayor o menor daño, en función de la profundidad alcanzada por el agua. Este número fue estimado en base al censo 2010 donde, para la ciudad de La Plata, la razón es de 3,3 habitantes por vivienda.

Cabe destacarse que habría que generar otro tipo de indicadores que permitan a especialistas abordar el tema con más detalle. Las velocidades del agua afectan a la población infantil o de tercera edad, debido al arrastre que ejerce sobre los cuerpos. Las alturas de agua afectan principalmente a las viviendas, debiendo considerar la calidad y tipo de viviendas construidas. Aquí las profundidades y la permanencia tienen implicancias directas sobre los daños a las viviendas. Sobre la salud se puede decir que quedará afectada simplemente con la presencia de agua dentro de las viviendas, las Necesidades Básicas Insatisfechas y también la permanencia del agua.

Además, con estos datos, y siguiendo normativas específicas, por ejemplo europeas, es posible calcular o estimar, para recurrencias de 100 años y mayores, la cantidad de personas susceptibles de ser heridas o muertas, lo cual permitiría dimensionar la capacidad de atención de emergencias en hospitales o equipos de salvataje, como es Defensa Civil, para contemplar los planes de contingencias. Del mismo modo se podrá planificar la infraestructura básica a resguardar para realizar las contingencias. Y con otro tipo de evaluaciones se puede inferir el daño susceptible de producirse en cada uno de estos eventos, de muy baja probabilidad de ocurrencia pero de magnitudes muy significativas.

Los Planes de Contingencia están directamente relacionados con los Riesgos susceptibles de producirse por eventos pluviales de gran magnitud, por encima de las lluvias de diseño, y que no han quedado cubiertos por las Obras Estructurales definidas con tales fines. Se sabe que se producirán y hay que estar preparados como sociedad para abordarlos: aquí radica la fortaleza de los planes de contingencia. Esto no va en contra de la Calidad de Vida de la Sociedad o población. Entonces se deben plantear estándares de calidad para estas situaciones: qué cosas se van a aceptar y cuáles no.

En estos casos es necesario plantear “decisiones de progreso”: a medida que los eventos suceden y/o aumentan en magnitud, ver cómo se alcanzan las metas de calidad pretendidas. Este proceso de alcanzar metas de calidad de vida requiere el planteo de pasos, en forma progresiva e irse retroalimentando a medida que suceden los eventos pluviales. La lluvia del 2 de Abril de 2013 debe ser una “lección aprendida” y resguardada en los “activos de la sociedad”.

## UN ANÁLISIS SOBRE EL RIESGO

La Gestión de los Riesgos de la Cuenca incluye los procesos para llevar a cabo la **planificación** de la gestión de riesgos, así como la **identificación, análisis, planificación de respuesta** y **control** de los riesgos que pueden presentarse en la Gestión Integrada de la cuenca, o en proyectos de Saneamiento Pluvial, en particular los riesgos de inundación y los derivados de ésta. Deben estar asociados los requerimientos de Calidad de Vida.

1. Planificar la Gestión de los Riesgos: Es el proceso de definir **cómo** realizar las actividades de gestión de riesgos de la cuenca, en el marco de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos.
2. Identificar los Riesgos: Es el proceso de **determinar** los riesgos que pueden afectar a la Gestión de la Cuenca y documentar sus características de estos riesgos identificados.
3. Realizar el Análisis Cualitativo de Riesgos: Es el proceso de **priorizar** riesgos para análisis o acción posterior, evaluando y combinando la probabilidad de ocurrencia e impacto de dichos riesgos. Fundamentalmente se hará hincapié en los riesgos derivados de las inundaciones.
4. Realizar el Análisis Cuantitativo de Riesgos: Es el proceso de **analizar numéricamente** el efecto de los riesgos identificados sobre los objetivos generales de la gestión de la cuenca.
5. Planificar la Respuesta a los Riesgos: Es el proceso **de desarrollar opciones y acciones para mejorar las oportunidades y reducir las amenazas** a los objetivos de la gestión integrada de la cuenca.
6. Controlar los Riesgos: Es el proceso de **implementar los planes de respuesta a los riesgos**, dar seguimiento a los riesgos identificados, monitorear los riesgos residuales, identificar nuevos riesgos y evaluar la efectividad del proceso de gestión de los riesgos a través de la propia gestión de la cuenca.

Todos estos procesos interactúan entre sí y podrían afectar otros procesos.

*Un riesgo puede tener una o más causas y, de materializarse, uno o más impactos.*

Los riesgos de proyecto como el de Saneamiento Pluvial tienen su origen en la incertidumbre que está presente en todos los eventos pluviales.

Siguiendo con definiciones y procedimientos decimos que los riesgos conocidos son aquellos que han sido identificados y analizados, lo que hace posible planificar respuestas para tales riesgos. A los riesgos conocidos que no se pueden gestionar de manera *proactiva* y se les debe asignar una **reserva para contingencias**. Aquí está el objetivo de nuestras investigaciones. El evento del 2 de Abril de 2013 no era considerado un evento posible, más allá que tampoco se tenía conocimiento de cómo actuar (contingencia) para eventos de recurrencias aún menores a éste.

*Un riesgo negativo que se ha materializado se considera un problema. Y fue un gran problema!*

Las instituciones, diferentes organizaciones y afectados (actores) o la sociedad en general, perciben el riesgo como el efecto de la incertidumbre sobre los objetivos perseguidos en la gestión de la cuenca o el planeamiento pluvial, y en particular, sobre sus propios intereses objetivos. Las instituciones, autoridades, organizaciones y los interesados están dispuestos a aceptar diferentes niveles de riesgo, en función de su actitud frente al riesgo que tenga toda la sociedad o comunidad local, etc, los grupos de actores directamente afectados.

Las actitudes frente al riesgo (en general) de las organizaciones y de los interesados pueden verse afectadas por una serie de factores, los cuales se clasifican a grandes rasgos en tres categorías:

- Aceptación del riesgo, que es el grado de incertidumbre que un grupo de personas o sociedad está dispuesta a aceptar, con miras a una recompensa o beneficio, o por economías de gastos.
- Tolerancia al riesgo, que es el grado, cantidad o volumen de riesgo que podrá resistir una sociedad, grupo o individuo.
- Umbral de riesgo, que se refiere a la medida del nivel de incertidumbre o el nivel de impacto en el que un interesado pueda tener particular interés. Por debajo de ese umbral de riesgo, la sociedad aceptará el riesgo. Por encima de ese umbral de riesgo, la sociedad no tolerará el riesgo. Es costumbre fijar estos valores referidos a eventos pluviales en Recurrencias del orden de los 10 años.

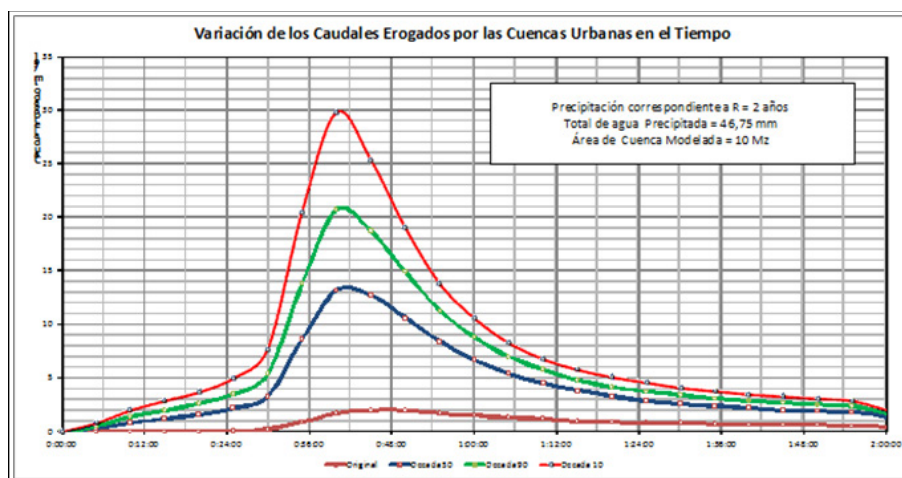
Por ejemplo, la actitud frente al riesgo de una comunidad puede incluir su aceptación por la incertidumbre, su umbral para los niveles de riesgo que son inaceptables o su tolerancia al riesgo, a partir de lo cual la comunidad puede solicitar o pretender una respuesta al riesgo diferente.

Pensemos en zonas a lotear, de muy bajo costo, con infraestructura baja o casi nula, en las cuales por necesidades de poder construir una vivienda, la comunidad acepta vivir en esas condiciones; sin embargo existe un umbral debajo del cual no se acepta vivir (necesidades básicas mínimas).

Los riesgos positivos y negativos se conocen normalmente como oportunidades y amenazas.

Si el riesgo se refiere a todo aquello que no está planeado en un determinado proyecto, los riesgos bien pueden ser positivos, en caso que algo no previsto sucede y afecta positivamente a la vida cotidiana, como una canalización producida con otros fines que mejora las condiciones en un determinado sector o área urbana o la ejecución de una red cloacal. Los riesgos negativos aparecen cuando suceden condiciones negativas que afectan como desbordes cloacales que ante lluvias intensas circulan por las aceras... y tantos otros ejemplos.

También existe un riesgo a consecuencia del crecimiento de la urbanización. Al crecer las superficies impermeables desde un valor cercano a cero hasta un FOS máximo de 0.60 en los loteos, una misma precipitación generará respuestas diferentes en los caudales y volúmenes de agua que circulan por las calles.



**Figura 13.-** Aumento de los caudales máximos desde un valor comparable a la época de la fundación de la ciudad de La Plata para una cuenca de aporte del orden de 10 manzanas, hasta el máximo caudal futuro correspondiente a la misma cuenca totalmente urbanizada, construida, con veredas y calles pavimentadas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Lluís Ribera Masgrau.** (2004). “Los mapas de riesgo de inundaciones”. *Departament de Geografia, Història i Història de l’Art Placa Ferrater Mora. Girona. España*

**Guillermo Víctor Malinow.** (2005). “Condición de Peligrosidad de Inundación para las Personas”. *RIOS 2005: Principios y Aplicaciones en Hidráulica de Ríos. H. D. Farias, J. D. Brea y R. Cazeneuve (Editores). ISBN 987-20109-4-3 (CD-ROM) & 987-20109-5-1 (libro). Segundo Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Neuquén, Argentina, 2-4 nov. 2005.*

**Instituto Nacional de Estadística y Censos.** (2010). Censo 2010. <http://www.indec.gov.ar/>

**SUFRI, Strategies of Urban Flood Risk Management** (2010), Universidad Politécnica de Valencia. Instituto de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente.

**Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, del Gobierno de España,** (2013), “Propuesta de Mínimos para la Metodología de Realización de los Mapas de Riesgo de Inundación”

**Dr Philip Haines (2012),** “The Newcastle City-Wide Floodplain Risk Management Study and Plan”

## ANEXO: STORM WATER MANAGEMENT MODEL (Modelo Matemático implementado)

En el marco del Proyecto de Investigación Orientado –PIO– relativos al estudio del Drenaje Pluvial en la cuencas de los Partidos de La Plata, Berisso y Ensenada, se ha realizado la modelación matemática de parte de la cuenca, hasta el momento, con los datos disponibles y recopilados, haciendo hincapié en las manchas que serían susceptibles de producirse ante eventos pluviales de características variadas.

A tal efecto, se han modelado lluvias diversas, para distintos niveles de Recurrencia, desde aquellas precipitaciones que tienen probabilidad de ocurrencia una vez cada 2 años hasta aquellas que tienen probabilidad de ocurrencia de una vez cada 100 años. Adicionalmente se modelaron lluvias como la correspondiente a la Precipitación Máxima Probable, que correspondería a la máxima precipitación que pudiera llegar a ocurrir sobre la cuenca. Y por último se modeló la lluvia ocurrida el día 2 y 3 de abril de 2013.

Los resultados de las máximas alturas posibles de alcanzar el agua para cada uno de los eventos estudiados, fue volcado sobre información cartográfica a los fines de determinar las zonas donde habría probabilidad que las aguas ingresen a las viviendas o bloques urbanos, en general se adopta una altura de 25 cm sobre las aceras, siendo el primer resultado de estos modelos los Mapas de Áreas Inundables, para cada una de las recurrencias analizadas.

Estos mapas así generados debieran ser consistentes con las zonas de planicies de inundación con los niveles que alcanzarían las aguas en dichas zonas.

### Aplicación del Modelo SWMM – esquematización de la red

La modelación matemática del área urbana del sistema en estudio ha sido realizada mediante el empleo del modelo matemático hidrológico e hidrodinámico “Storm Water Management Model” (SWMM) de la “United States Environmental Protection Agency” (EPA).

El SWMM es un modelo dinámico de simulación de precipitaciones, que puede ser utilizado para un único evento o para realizar una simulación continua en periodo extendido. Básicamente el Modelo SWMM de la EPA dispone de dos módulos operativos, un “Módulo de Escorrentía o Hidrológico” y un “Módulo de Transporte o Hidráulico”.

El “Módulo Hidrológico” funciona con una serie de superficies las cuales al ser “excitadas” mediante un evento de precipitación generan escorrentía. La visión conceptual del fenómeno de escorrentía utilizado por el SWMM se ilustra en el siguiente esquema:

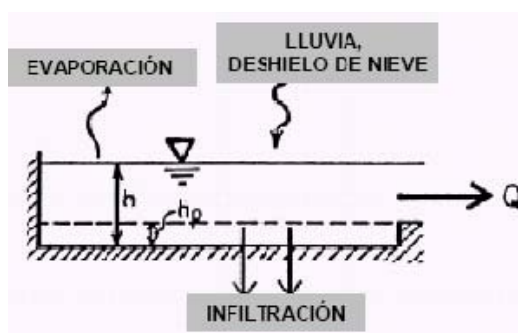


Figura 14.- Modelo Hidrológico

Cada una de las superficies se trata como un “depósito no lineal”. Los aportes de caudales provienen de los diferentes tipos de precipitación (lluvia, nieve) y de cualquier otra superficie situada aguas arriba. Existen diferentes caudales de salida tales como la infiltración, la evaporación y la escorrentía superficial. La capacidad de este “depósito” es el valor máximo de un parámetro denominado almacenamiento en depresión ( $h_p$ ). Cuando la profundidad del agua ( $h$ ) en este depósito excede dicho valor máximo, se produce la escorrentía superficial  $Q$  (por unidad de área). El caudal de salida se obtiene por aplicación de la ecuación de Manning. La profundidad de agua ( $h$ ) se actualiza



continuamente en cada uno de los instantes de cálculo mediante la resolución numérica del balance de caudales en la cuenca.

El caudal de salida responde a la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{W}{n} (h - h_p)^{5/3} I_0^{1/2} \quad [1]$$

donde

- Q: caudal de salida de la sub cuenca, [m<sup>3</sup>/s].
- W: ancho de la sub cuenca, [m].
- n: coeficiente de rugosidad de Manning.
- h: profundidad del agua, [m].
- h<sub>p</sub>: profundidad de la detención superficial, [m].
- I<sub>0</sub>: pendiente de la cuenca.

La ecuación del depósito no lineal se establece resolviendo el sistema de ecuaciones que constituyen la ecuación de continuidad y la ecuación de Manning.

La continuidad para cada sub cuenca es:

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dh}{dt} = A \cdot i - Q \quad [2]$$

- V: es el volumen de agua en la sub cuenca (V = A·h), [m<sup>3</sup>/s].
- h: es la profundidad de agua, [m].
- t: es el tiempo, [s].
- A: superficie de la sub cuenca, [m<sup>2</sup>].
- i: intensidad de lluvia neta (precipitaciones menos infiltración y evaporación), [m/s].
- Q: caudal de salida de la sub cuenca según [1], [m<sup>3</sup>/s]

Las dos ecuaciones anteriores se combinan para dar lugar a la ecuación diferencial no lineal, a resolver para la profundidad,

$$\frac{dh}{dt} = i - \frac{W}{A \cdot n} (h - h_p)^{5/2} I_0^{1/2} \quad [3]$$

Esta ecuación se resuelve mediante un esquema en diferencias finitas de Newton-Raphson, para cada incremento de tiempo. Por este motivo, es conveniente evitar sub cuencas de pocos metros cuadrados con incrementos de tiempo largos (varios minutos), para prevenir problemas de convergencia del esquema.

Los parámetros que se introducen en el modelo pueden servir para ajustar la respuesta del mismo. Por ejemplo, W corresponde al ancho de la sub cuenca que si bien puede representar un valor geométrico de la misma, en cuencas irregulares no corresponde a ningún valor específico y se puede utilizar para, como se dijo, ajustar la respuesta de la escorrentía, que es lo que en definitiva interesa representar. Es así que, para una misma superficie, un mayor ancho producirá hidrogramas de salida de la sub cuenca de menor duración y mayor caudal de punta, mientras que un ancho menor retrasará el pico del hidrograma, produciendo un efecto de laminación. Sin embargo, un efecto similar puede lograrse ajustando otras variables, como por ejemplo el coeficiente de rugosidad de Manning, que para

valores elevados dará caudales pico menores y tirantes mayores. De forma similar se puede plantear con otros parámetros como la pendiente de las sub cuencas. Estos ajustes corresponden a la etapa de análisis de sensibilidad y de calibración del modelo y requieren un conocimiento elevado de la cuenca estudiada.

Las cuencas pueden dividirse en sub áreas impermeables y sub áreas permeables. Las sub áreas impermeables pueden dividirse a su vez en dos: una que contiene el almacenamiento en depresión y otra que no lo contempla.

Para la determinación de la escorrentía producida en las distintas sub áreas, el SWMM permite seleccionar el modelo de transformación lluvia-escorrentía a emplear y definir de este modo la cantidad de lluvia que escurrirá hacia el sistema de desagüe. Los métodos de transformación lluvia-escorrentía que pueden ser utilizados por el modelo son los siguientes:

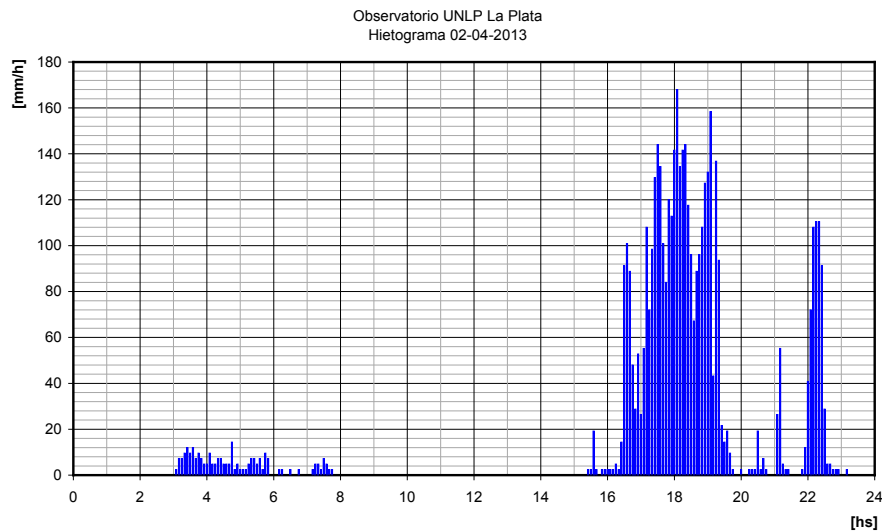
- Método de Horton. Se basa en observaciones empíricas y propone que la infiltración decrece exponencialmente desde un valor inicial máximo hasta un cierto valor mínimo a lo largo del evento. Los parámetros de entrada necesarios para este modelo son los valores de infiltración máxima y mínima, el coeficiente de decaimiento que describe lo rápido que se produce la disminución de la infiltración a lo largo del tiempo, y el tiempo necesario para que un suelo completamente saturado se drene totalmente
- Método de Green & Ampt. Para modelar el fenómeno de la infiltración este método considera la existencia de un frente húmedo brusco (sharp wetting front) en el perfil que separa el suelo con un determinado contenido inicial de humedad del completamente saturado de la parte superior. Los parámetros necesarios son el valor del déficit inicial de humedad del suelo, la conductividad hidráulica del mismo y la altura de succión en el frente húmedo.
- Método del Número de Curva (CN). Este método es una aproximación adoptada a partir del denominado Curve Number (CN) del “Soil Conservation Service” (SCS) de los EEUU, para estimar la escorrentía. La capacidad total de infiltración del suelo puede encontrarse en una tabla de Números de Curva tabulados. Durante un evento de precipitación esta capacidad se representa como una función de la lluvia acumulada y de la capacidad de infiltración restante. Los parámetros de entrada para este método son el Número de Curva (CN), la conductividad hidráulica del suelo (utilizada para estimar un tiempo de separación mínimo entre los distintos eventos de lluvia) y el tiempo que tarda el suelo en saturarse completamente cuando inicialmente era un suelo completamente seco.

La escorrentía superficial puede infiltrarse en la parte superior del terreno de las sub áreas permeables, pero no a través de las sub áreas impermeables. El flujo de escorrentía desde una sub área de la cuenca puede fluir hacia otra sub área, o ambas pueden drenar directamente hacia la salida de la cuenca.

Los datos de entrada requeridos para realizar la ejecución del “Módulo Hidrológico” son:

Datos meteorológicos: se debe introducir el evento (o eventos) de lluvia, como por ejemplo, mediante datos de intensidad de lluvia en intervalos fijados de tiempo y duración total (hietograma) o como lluvia total en mm.

A continuación se muestra en el Gráfico 1 el hietograma para una lluvia de registrada el día 2 de Abril de 2013 con el registro del pluviógrafo del Observatorio de la Universidad Nacional de La Plata.



**Gráfico 1**

Características de las sub cuencas: Debe introducirse la siguiente información

- Asignación de un evento de lluvia (hietograma) a cada sub cuenca. Se utilizó el hietograma correspondiente al Observatorio (Gráfico 1) para todas las sub cuencas a los fines de determinar la “mancha de inundación correspondiente al día 2 de Abril de 2013. De la misma forma se procedió con cada una de las precipitaciones analizadas
- Número de identificación de la sub cuenca.
- Nodo al que se conecta.
- Ancho de la sub cuenca (W). Este valor está asociado al área y a la longitud de la sub cuenca y éste al tiempo de concentración. Se procedió de la siguiente manera: siendo las calles las vías preferenciales de escurrimiento en las cuencas urbanas, se determinó la longitud (L) del recorrido por calle mas largo dentro de la sub cuenca hasta el punto de concentración de la cuenca (nodo calle). Con ésta longitud y el área medida de la cuenca se calculó  $W = A/L$ .
- Área de la sub cuenca (A).
- Pendiente media de la sub cuenca (I0). Fue determinada con la diferencia altimétrica ( $\Delta h$ ) de los extremos del recorrido por calle (L).  $I0 = \Delta h/L$
- Coeficiente de rugosidad de Manning de las zonas permeables e impermeables. Se adoptaron valores de 0.05 y 0.025 respectivamente.
- Volumen de almacenamiento o retención en la zona permeable e impermeable. No se fijaron volúmenes de almacenamiento.
- Parámetros de infiltración, según la ecuación de Horton:

$$f_p = f_{\infty} + (f_0 - f_{\infty}) \cdot e^{-\alpha \cdot t} \quad [6]$$

- $f_p$  : capacidad de infiltración.
- $f_0$  : capacidad de infiltración inicial (en mm/h).
- $f_{\infty}$  : capacidad de infiltración del suelo saturado (en mm/h).
- $\alpha$  : coeficiente de reducción de infiltración (en 1/h).
- $t$  : tiempo desde el inicio de la lluvia.

En este punto se trabajó con información generada por el Instituto de Suelos, en cuanto a tipo de suelo, y características de infiltración, datos recopilados por distintos autores sobre parámetros de infiltración y relevamientos de campo realizados a este efecto.

Características de los conductos o canales de desagüe: Son los conductos por los que se puede conducir la escorrentía. Suele corresponder a las propias calles y vías de comunicación de la cuenca y quedan delimitados por sus márgenes. Estos canales pueden atravesar varias subcuencas. Requieren la definición de los siguientes parámetros:

- Número de identificación.
- Identificación de los nodos de entrada y salida.
- Forma, que puede dar en forma predefinida (trapezoidal, circular, etc.) o de una forma irregular definida externamente.
- Coeficiente de rugosidad de Manning.
- Profundidad máxima.
- Caudal inicial.
- Longitud.
- Desniveles con los nodos de entrada y salida.

En el sector urbano de la ciudad de La Plata se modeló cada calle como un conducto (canal con forma irregular representativa del tipo de calle), en cada esquina se definió un nodo-calle, a éstos se conectaron los conductos-calle, la cota de fondo de éstos nodos corresponde a la cota IGM de los ejes de calle, según el relevamientos altimétrico existentes. Las cotas de estos nodos, junto con la longitud del conducto-calle, definen la pendiente del mismo. Se adoptaron tres tipos de calles en las cuales varían las formas y los parámetros de rugosidad (calle de tierra, calle pavimentada y avenida pavimentada).

El “**Módulo Hidráulico**” del SWMM analiza el transporte de la lámina de agua o escorrentía (generada en las distintas superficies que definen las cuencas de aporte), a través de un sistema compuesto por tuberías, canales, dispositivos de almacenamiento, bombas, elementos reguladores y sobre todo por las calles, considerando posibles almacenamientos dentro de las viviendas según el nivel alcanzado por las aguas. El transporte de agua por el interior de cualquiera de los conductos representados en SWMM está gobernado por las ecuaciones de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento, tanto para el flujo gradualmente variado como para el flujo transitorio (ecuaciones de Saint Venant). El usuario del software puede seleccionar el nivel de sofisticación con que desea resolver estas ecuaciones. Por ello existen tres modelos hidráulicos de transporte, sin embargo, para caso de grandes crecidas e inundaciones, donde en muchos casos se puede invertir el sentido de escurrimiento, se adopta el:

- **Modelo de Onda Dinámica.** Este modelo de transporte resuelve las ecuaciones completas unidimensionales de Saint Venant y por tanto teóricamente genera los resultados más precisos. Estas ecuaciones suponen la aplicación de la ecuación de continuidad y de cantidad de movimiento en las conducciones y la continuidad de los volúmenes en los nodos. Con este modelo es posible representar el escurrimiento a presión, de forma que el caudal que circula por el conducto puede exceder el caudal a sección llena obtenido mediante la ecuación de Manning. Las inundaciones ocurren en el sistema cuando la profundidad del agua en los nodos excede el valor máximo disponible en los mismos (usualmente representada por la diferencia entre el nivel del fondo de la cámara y el nivel del terreno). Este exceso de caudal bien puede perderse o bien puede generar un estancamiento en la parte superior del nodo y volver a entrar al sistema posteriormente. El modelo de transporte de la Onda Dinámica puede contemplar efectos como el almacenamiento en los conductos, el resalto hidráulico, las pérdidas de carga en la entrada y salida de los conductos, el flujo inverso y el flujo a presión. Dado que resuelve de forma simultánea los valores de niveles de agua en los nodos y los caudales en las conducciones puede aplicarse para cualquier tipo de configuración de red de desagüe, incluso en el caso de que contengan nodos con múltiples divisiones del flujo aguas abajo de los mismos o incluso mallas en su trazado.

El modelo SWMM permite:

- Simular redes de tamaño ilimitado
- Utilizar una amplia variedad de geometrías para las conducciones, tanto abiertas como cerradas y canales naturales
- Simular elementos de control tales como almacenamientos, partidores de caudales, estaciones de bombeo, vertederos y orificios
- Simular distintos tipos de escurrimiento como efectos de remanso, escurrimiento a presión, flujo inverso y almacenamiento superficial
- Aplicar controles dinámicos definidos por el usuario para simular, por ejemplo, el funcionamiento de bombas o la apertura de orificios

Este conjunto “flexible” de herramientas de modelación permite simular, adecuadamente, un sistema dual de desagües pluviales, en el que se contempla tanto la red de calles (Sistema Mayor) como la red de conductos (Sistema Menor).

Las ecuaciones de Saint-Venant que resuelve el “Módulo Hidráulico” son las siguientes:

- Ecuación de continuidad para secciones prismáticas

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad [7]$$

donde

A: área de la sección.

Q: Caudal.

x: distancia a lo largo del conducto

t: tiempo.

- Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left( \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + g \cdot A \frac{\partial H}{\partial x} + g \cdot A \cdot S_f = 0 \quad [8]$$

donde

g: gravedad.

H: cota piezométrica ( $H=z+h$ ).

z: cota de la solera o fondo del canal/conducto.

S<sub>f</sub>: pendiente de fricción, según la ecuación de Manning.

Para resolver este sistema de ecuaciones diferenciales, el módulo hidrodinámico usa una descripción de la red en nodos (“junctions” o “nodes”) y conductos (“links”), con elementos singulares tales como orificios, depósitos, vertederos, para representar matemáticamente el prototipo físico. Así, se usa la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento en los conductos, y una modificación de la ecuación de continuidad en los nodos.

SWMM combina de las ecuaciones [7] y [8] en una sola y la resuelve para todos los conductos en cada intervalo de tiempo:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} - 2U \frac{\partial A}{\partial t} - U^2 \frac{\partial A}{\partial x} + g \cdot A \frac{\partial H}{\partial x} + g \cdot A \cdot S_f = 0 \quad [9]$$

Donde:

U: velocidad media.

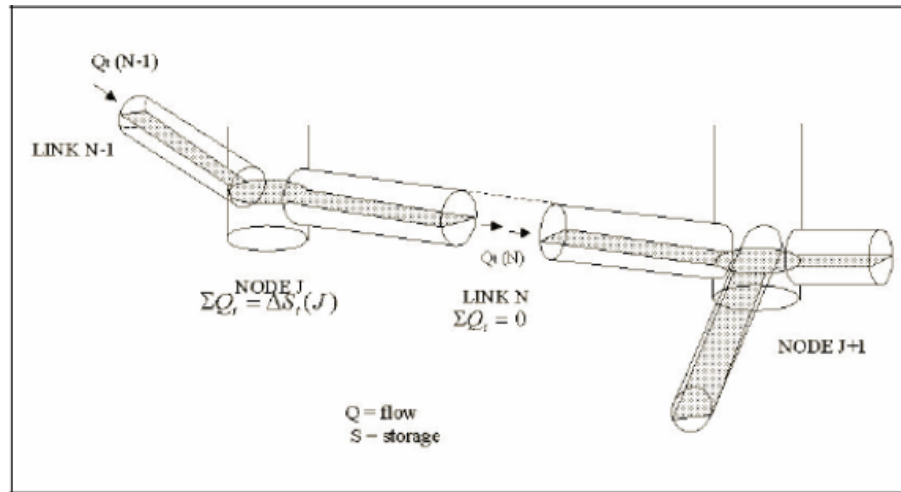


Figura 15.- Esquema de Nodos y Conducciones

Por otro lado, aplica la ecuación de continuidad en los nodos para cada intervalo de tiempo:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \sum \frac{Q}{A_s} \quad [10]$$

donde

As: área del nodo (según la Figura 15, el área incluye el nodo propiamente dicho y el área correspondiente a la mitad de la longitud de los conductos que confluyen a ese nodo).

Las ecuaciones [9] y [10] se resuelven de forma secuencial para determinar el caudal en cada conducto y la profundidad en cada nodo para cada intervalo de tiempo mediante el método de *Euler modificado*, en un esquema de diferencias finitas explícito. Este esquema implica operaciones sencillas y poco espacio de almacenamiento comparado con los métodos implícitos, pero son generalmente menos estables numéricamente y requieren incrementos de tiempo pequeños.

Las condiciones que se deben cumplir para que el esquema sea estable son:

- Condición de *Courant*, donde el incremento de tiempo está limitado al tiempo necesario por una onda dinámica para propagarse en el conducto,

$$\Delta t \leq \frac{L}{\sqrt{g \cdot h}}$$

donde

$\Delta t$ : incremento de tiempo.

L: longitud del conducto.

h: profundidad máxima del conducto.

g: aceleración de la gravedad.

Condición sobre los nodos,

$$\Delta t \leq 0.1 \cdot A_s \frac{\Delta H_{\max}}{\Sigma Q}$$

donde

$\Delta H_{\max}$ : elevación máxima del agua en  $\Delta t$ .

$\Sigma Q$ : caudal neto de entrada al nodo.

El cumplimiento de las dos ecuaciones anteriores será más restrictivo en los conductos más cortos y con mayores entradas de caudal. En general son comunes incrementos de tiempo de pocos segundos (10 a 30 segundos). El programa acepta un incremento de tiempo mínimo de 1 segundos.

Para la modelación de la ciudad de La Plata se utilizó un incremento de 5 segundos. Con este paso de cálculo las corridas resultaron ser estables y el tiempo de cálculo fue de varios minutos.

Los datos de entrada requeridos por el módulo hidrodinámico son:

1. Datos procedentes del módulo hidrológico.

2. Duración de los incrementos de tiempo.

- Incremento de tiempo para el cálculo de las ecuaciones (teniendo precaución de cumplir las condiciones de estabilidad numérica). Valor utilizado  $\Delta t = 5$  segundos.
- Duración total de la simulación. La modelación debe durar lo suficiente para permitir el paso de los picos de caudales y niveles en todos los conductos y nodos de la red modelada. La duración de la corrida fue de 2 días.

3. Características de los colectores y estructuras de vinculación.

- Número de identificación del colector.
- Número de identificador de los dos nodos que une el conducto.
- Caudal inicial en el conducto.
- Tipo de conducto y sus dimensiones.
- Longitud del conducto.
- Desnivel de los extremos del conducto con respecto a la cota de fondo de los nodos.
- Coeficiente de rugosidad de Manning.

4. Características de los nodos. Los nodos (o juntions) son los puntos de entrada de la transformación lluvia-caudal, puntos donde se conectan los conductos (sistema mayor y menor) y todas las estructuras de vinculación. Los nodos son los puntos de conexión superficie – red de drenaje. Pueden existir nodos sin entrada de escorrentía, y que tengan sólo la función de conectar conductos de la red de drenaje. La información requerida por el programa es

- Número de identificación del nodo.
- Cota.
- Altura máxima. Asociado con la cota de la calle con respecto al nodo (en los nodos conductos de la red de desagües) y que define la profundidad de agua para la cual el agua sale del sistema menor (conductos) al sistema mayor (calles).

5. Depósitos de retención. Se debe definir la cota de la solera, la ley altura-área, profundidad máxima y la profundidad inicial.

6. Orificios y vertederos. Se definen el coeficiente de descarga, área y cota.

7. Condiciones de borde. La esquematización de la red para el traslado de los caudales por calles, canales (incluidos cursos naturales) y conductos de la red existente y la vinculación entre ambas redes propuesta es la mostrada en la figura 16.

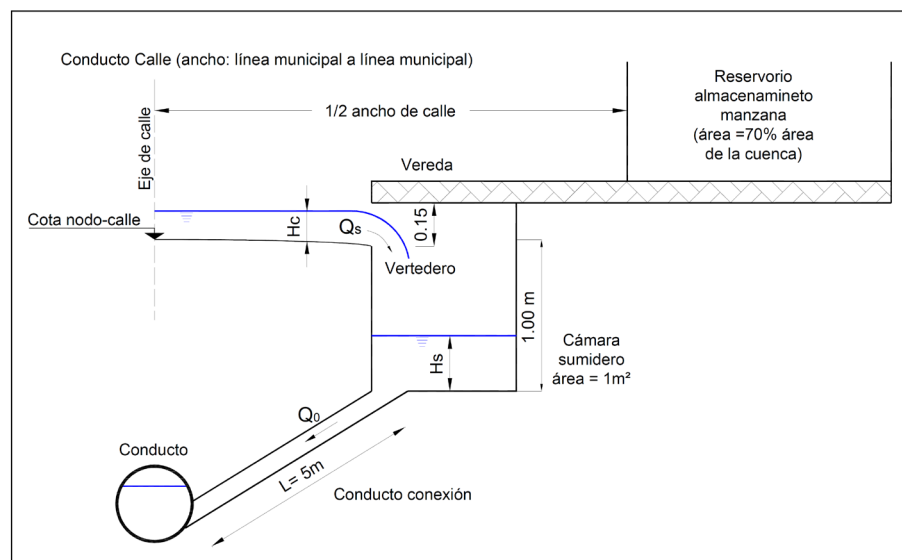


Figura 16.- Esquema de Nodos y Conducciones

### Modelo SWMM – Criterios de Modelización

Como se indicara anteriormente, este modelo presenta un conjunto “flexible” de herramientas de modelación que permiten simular, adecuadamente, un sistema dual de desagües pluviales. Es decir un sistema en el que se contempla tanto la red de calles (Sistema Mayor), como la red de conductos (Sistema Menor).

Este tipo de esquematización (sistema dual), permite interpretar en forma más aproximada los complejos procesos físicos que se desarrollan en cuencas urbanas cuando son excitadas por una precipitación. Desde luego que la calidad de la “aproximación” que se logre estará fuertemente ligada a la forma en que se represente el sistema y los elementos que lo componen (calles, conductos, sumideros, etc.).

Es por ello, que una parte importante de la tarea de modelación consiste en interpretar las herramientas de las que se dispone, o que brinda el modelo a emplear, y la forma de combinar las mismas, para lograr un resultado lo más aproximado posible a la realidad física que se intenta representar.

También es sabido que las esquematizaciones “sencillas” suelen dar muy buenos resultados, y que es preferible recurrir a esquemas “simplificados” antes que introducir muchos parámetros, que generalmente son de difícil evaluación, y sobre los que, en general, en zonas urbanas, se cuenta con poca información para su posterior “ajuste”. Sobre esta base conceptual es que se ha buscado emplear las posibilidades que brinda el modelo SWMM para representar tanto los procesos de tipo hidrológico (transformación lluvia – caudal), como los hidráulicos (escurrimiento a través de los distintos componentes del sistema), en forma sencilla y con parámetros fácilmente evaluables.

Como se indicara anteriormente, la esquematización de un sistema dual requiere la representación de dos sistemas: el mayor (que es la red de calles y por lo tanto puede ser considerado como una malla de canales) y el menor (que es la red de conductos). Tanto la red de calles como de



conductos brindan la posibilidad de efectuar simulaciones más o menos detalladas, por ejemplo es común que los proyectistas recurran a esquematizaciones “simplificadas” en las que, en muchos casos, se concentran calles por medio de esquemas equivalentes (menos calles de mayor capacidad de conducción) o se limita la modelación a la red principal de conductos (por ejemplo diámetros mayores de un metro). De acuerdo con la experiencia en otras modelaciones de áreas urbanas, ha resultado siempre más favorable la modelización de los sistemas en forma completa. Es por ello que, como primer criterio, se ha considerado conveniente modelar el sistema de calles con un importante grado de detalle y la red de conductos existentes en forma completa, es decir sin introducir simplificaciones en los aspectos geométricos de la modelación. En definitiva se han modelado la casi totalidad de las calles de la ciudad.

El sistema mayor ha sido modelado mediante nodos de calle. El dato requerido por el modelo es la cota del nodo, que corresponde a la cota de la calle. Las calles se representan mediante “links”, que no son más que la vinculación entre dichos nodos de calle. Desde el punto de vista de la representación de las características físicas de las calles, las mismas han sido tipificadas en tres (3): avenidas pavimentadas, calles pavimentadas y calles de tierra.

El sistema menor ha sido modelado mediante nodos de conducto. El modelo requiere como dato la cota de fondo del nodo de conducto y la profundidad máxima. Los conductos se caracterizan por medio de la sección transversal, la longitud y el coeficiente de rugosidad de Manning. La pendiente del conducto queda determinada por la cota de los nodos a los que se conecta y por su longitud.

La vinculación entre calles y conductos ha sido simulada mediante la conexión del nodo de calle y el de conducto por medio de un vertedero lateral, que representa el ingreso al sumidero, imbornal o boca de tormenta. En todos los casos las vinculaciones entre nodos se identifican con los números de estos. El vertedero lateral (tipo “side flow” en el modelo), se caracteriza con la longitud, la altura (0.15 metros) y el coeficiente de gasto.

Otro aspecto que ha sido tenido en cuenta en la modelación, y que resulta interesante destacar, es la consideración de un almacenamiento en manzana. Cuando se producen eventos de magnitud tal que generan excesos superficiales que escurren por las calles con tirantes superiores a las alturas de los cordones o cunetas de las veredas y los umbrales, por ejemplo escurrimientos con tirantes superiores a los 25/30 centímetros, respecto al eje de calle, hay ingreso de agua a las propiedades y daños a las mismas. Dichos ingresos se traducen en almacenamientos que, en cierta medida, amortiguan el escurrimiento. Este efecto ha sido representado mediante la consideración de volúmenes de almacenamiento disponible en cada manzana. La esquematización de este proceso se ha efectuado mediante la introducción de nodos de almacenamiento en manzana (ver figuras 2 y 3), los que han sido identificados con la letra “R” y el número del nodo de calle correspondiente, por ejemplo R1001. Los nodos de almacenamiento en manzana se caracterizan mediante una ecuación de almacenamiento (volumen de almacenamiento como función de la altura). Fueron definidos reservorios prismáticos siendo  $VR=AR \cdot h$ , donde VR es el volumen almacenado, AR el área (70 % el área de la cuenca) y h la altura de agua en el reservorio. La vinculación entre los nodos de calle y los de almacenamiento en manzana, ha sido representada mediante un orificio lateral de sección rectangular de 0,05 a 0,10 metros de altura y 10 metros de largo en general, variando con la conformación de las parcelas, con un coeficiente de gasto de 0,6 a 0,8. Las dimensiones del orificio intentan representar, en cierta forma, la sección de ingreso a las viviendas (rendijas bajo las puertas). Se pondera la cantidad de lotes baldíos a través de imágenes satelitales o imágenes aéreas.

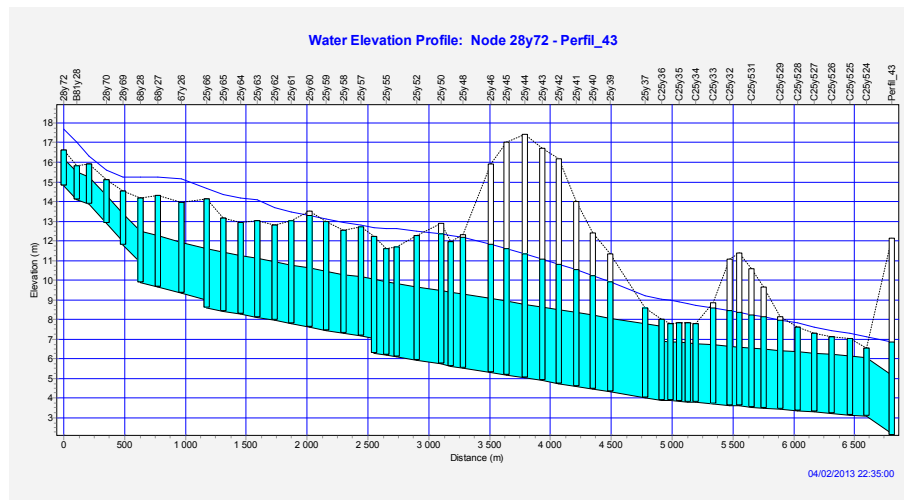
Las cuencas rurales se modelaron en forma con concentrada y sin almacenamiento.

La lluvia fue considerada tal cual figura en los gráficos 1.

En la situación de verificación de la tormenta del 2-4-2013, en la cual el sistema menor fue sobrepasado en su capacidad, los conductos funcionaron a sección llena observándose en muchos casos un reflujo desde la red menor (desagües) hacia la red mayor (calles)

Como ejemplo se presenta en la Figura 17 el perfil longitudinal del conducto de la Calle 25 desde 28 y 72 hasta la desembocadura en el A° del Gato en 25 y 522, para el instante de paso del pico de caudal. Se observan las líneas que definen el fondo y techo del conducto, el terreno natural (en línea punteada) y la línea piezométrica (en azul). Puede observarse en varios tramos (desde 28 y 72 hasta 25

y 48, desde 25 y 37 hasta 25 y 33 y desde 25 y 529 hasta la desembocadura) que la línea piezométrica se encuentra por encima de la línea del terreno natural, lo que significa que en dicha zona los sumideros y conductos no poseían capacidad para permitir el ingreso del agua de superficie, o peor aún, oficiaron de fuentes de agua desde los conductos hacia las calles.

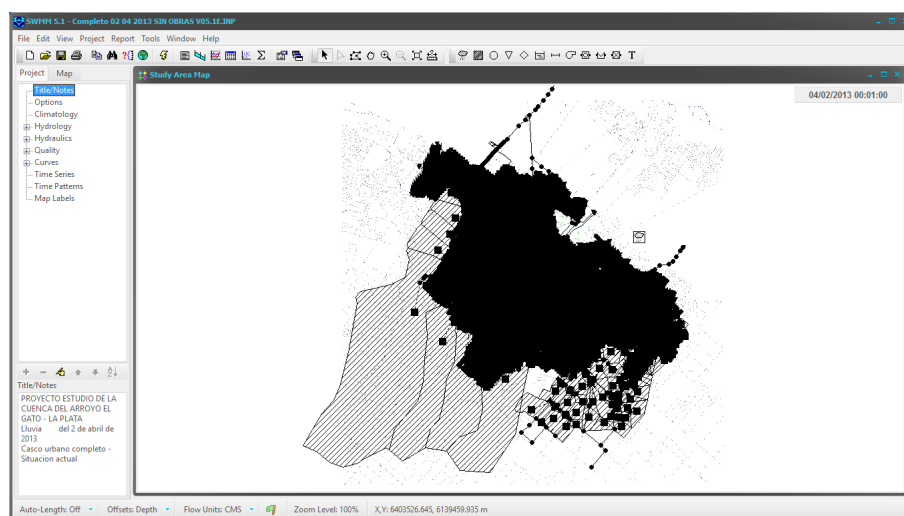


**Figura 17-** Perfil longitudinal derivador de calle 25

Existen muchas formas de evaluación del funcionamiento y la eficiencia de un sistema de desagües pluviales, los que van desde la mera observación y descripción de la mitigación lograda con el mismo, hasta la adopción de indicadores de dicha mitigación. Es común, por ejemplo, la cuantificación del índice  $U \cdot h$  (velocidad de escurrimiento multiplicado por el tirante de escurrimiento en calle). En base a dicho índice se identifican rangos admisibles de transitabilidad y a partir de los mismos se puede identificar tanto la importancia del problema como la mitigación lograda.

En el evento del 2 de Abril de 2013 hubo importantes zonas en las cuales se superaron los límites admisibles.

Las superficies estudiadas para el análisis totalizan 12.257 Ha, de las cuales 612.3 Ha corresponden al A° del Bosque, 633.5 Ha corresponden al A° Circunvalación y conductos que drenan por calle 66 y 122, y el resto, con 11.011 Ha corresponde a la cuenca del A° del Gato, incluyendo la margen izquierda que contempla parte de los barrios de Ringuelet y Villa Castells y la zona del Hipódromo, que drena a través de una canal vinculado a la canalización del A° del Gato.



**Figura 18.-** Visualización de los datos volcados en el modelo matemático SWMM

Como ha sido mencionado anteriormente, el esfuerzo realizado al volcar toda la información sobre este modelo matemático SWMM, “Storm Water Management Model” de la “United States

Environmental Protection Agency” (EPA), que es un modelo hidrológico e hidrodinámico, radica en que es un modelo de uso libre.

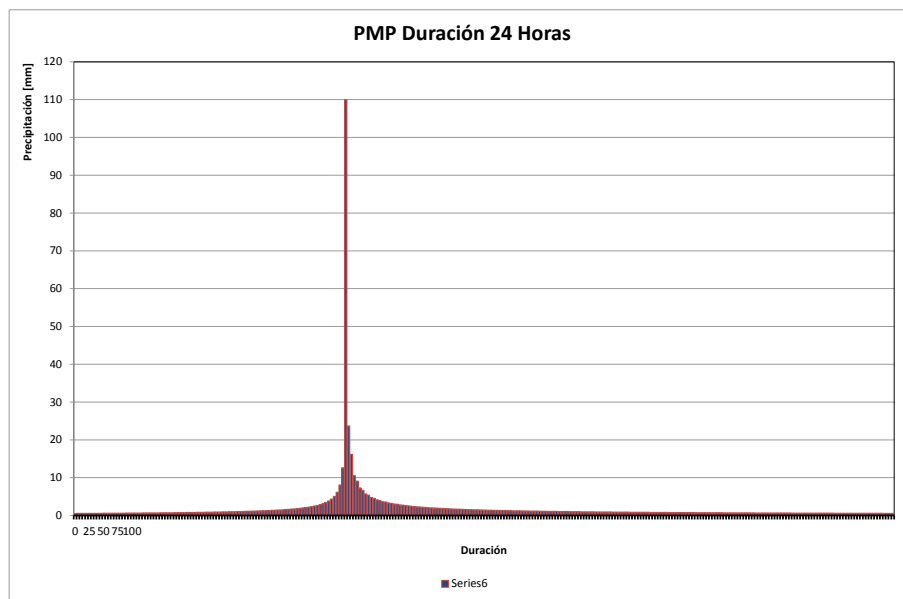
### **Otras lluvias modeladas.**

Con referencias al resto de las lluvias modeladas, se obtuvieron en forma sintéticas las precipitaciones, en intervalos de 5 minutos concentrando el máximo de la lluvia en la situación del primer tercio del tiempo, con ocurrencia del pico máximo a la hora, para una duración de 3 horas.

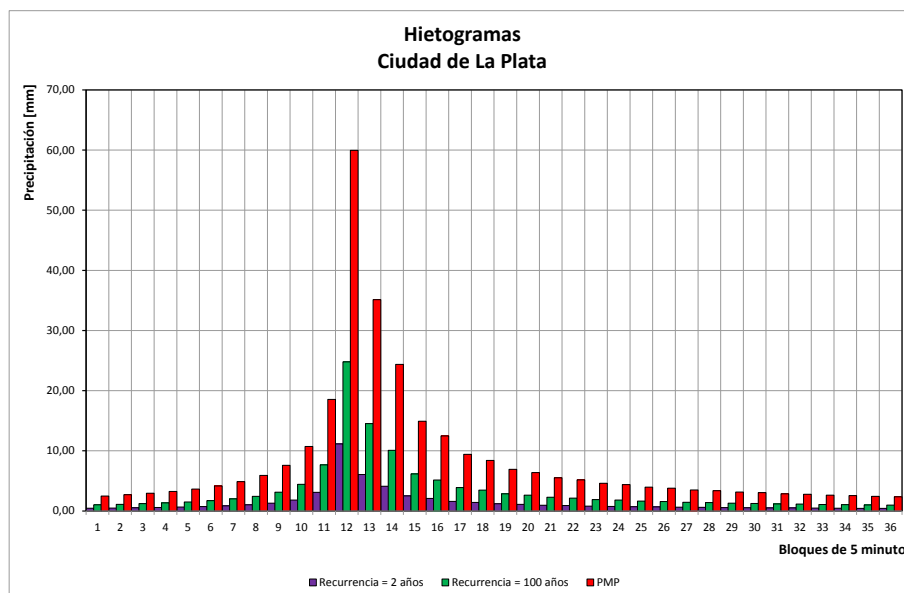
Esta duración fue adoptada en vistas del tiempo máximo de concentración de la cuenca.

El primero de los gráficos siguientes, Gráfico 2, muestra la Precipitación Máxima Probable adoptada en 24 horas, que totaliza un valor máximo precipitable de 540 mm [Romanazzi 2013].

Para precipitaciones de menor duración se obtienen gráficos como el Gráfico 3, donde se muestran las precipitaciones adoptadas para recurrencias de 2 años y 3 horas de duración, con 52 mm totales, la recurrencia de 100 años y 3 horas de duración con 124,5 mm precipitados, y la PMP adoptada para 3 horas de duración que tiene un valor de lluvia precipitable de 301 mm. En particular, esta lluvia daría manchas de riesgo de inundación menores a la ocurrida el 2 de abril de 2013, aunque esta última tuvo una duración total de 24 horas con una precipitación cercana a los 390 mm. Por tal motivo se realizó una nueva corrida del modelo con la PMP de duración 24 horas y de 540 mm.



**Gráfico 2**



**Gráfico 3**

**ANEXO: PLANOS GENERADOS EN EL MARCO DE ESTA INVESTIGACIÓN**

En el marco del Proyecto de Investigación Orientado –PIO– relativos al estudio del Drenaje Pluvial en las cuencas de los Partidos de La Plata, Berisso y Ensenada, se han producido mapas y documentación gráfica, compartida con otros grupos de trabajo.

A continuación se presenta dicha documentación:

**(son 5 planos en pdf tamaño A4)**