Validación de un modelo hidrológico-hidráulico en una cuenca urbana con información generada por los afectados a inundaciones

Federico García Rojo, Mariano Re, Leandro D. Kazimierski y Nicolás D. Badano

Programa de Hidráulica Computacional, Laboratorio de Hidráulica, Instituto Nacional del Agua - Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires.

E-mail: federico.garciarojo@gmail.com

RESUMEN: La cuenca del arroyo Dupuy, ubicada en la localidad de Laferrere (La Matanza) en la Región Metropolitana de Buenos Aires, durante los últimos años ha sufrido numerosas inundaciones producto de distintos eventos hidrometeorológicos. Estas precipitaciones han ocasionado el desborde del arroyo Dupuy y, en algunos casos, del río Matanza-Riachuelo (del cual el primero es tributario). La población estimada de esta cuenca es de 200.000 habitantes. La frecuencia y magnitud de los eventos sumado a la gran cantidad de afectados motivó un estudio de la dinámica del agua en la misma, con el objetivo de desarrollar herramientas para la implementación de medidas no estructurales de mitigación de las inundaciones (principalmente sistemas de alerta temprana). Para analizar la dinámica del agua en la cuenca se implementó un modelo numérico hidrológico-hidráulico con el software EPA SWMM. El grado de detalle de esta implementación implicó la utilización de una metodología automática para la generación del modelo llevada a cabo con el software ConuPy. En esta cuenca, la carencia de observaciones sistemáticas de las variables típicas de validación de estos modelos, implicó la utilización de información que indirectamente permitió caracterizar a distintos eventos de precipitación y su impacto sobre la cuenca. Vecinos Autoconvocados del Arroyo Dupuy es una organización de inundados que persigue la implementación de las medidas necesarias para mitigar esta situación y que registra cada uno de los eventos que impactan sobre la cuenca. La validación de este modelo se realizó a partir de un registro fotográfico de áreas inundadas, a partir de las cuales se estimaron niveles de agua en calle, y de una caracterización de cada evento sufrido en la que se detalló información vinculada a la permanencia del agua, volumen precipitado, los niveles alcanzados y un orden de gravedad del evento de acuerdo a la percepción de los afectados.

INTRODUCCIÓN

La localidad de Laferrere, en el centro del partido de La Matanza (Provincia de Buenos Aires), está surcada por los arroyos Don Mario, Susana y Dupuy, que luego de un recorrido de norte a sur descargan sus aguas sobre el río Matanza-Riachuelo (Figura 1). Dos de las tres cuencas de estos arroyos (Don Mario y Susana), están intervenidas con obras hidráulicas: entubados y canalizaciones. El arroyo Dupuy prácticamente no tiene intervenciones y en la mayor parte de su recorrido lo hace a cielo abierto. La población estimada de esta cuenca es de 200.000 habitantes.

La dinámica de precipitaciones de los últimos años en la zona (2010-2015), particularmente los años 2012 y 2014, con anomalías de precipitación anual de 225 y 498 mm (1.005 mm por año, según la serie 1960-2014 de Ezeiza) y de cantidad de días lluviosos (precipitación mayor a 20 mm) de 22 y 26 respectivamente (la

media es 16 días lluviosos por año según la misma serie), conjugada con una situación de urbanización creciente de la cuenca y un proceso de abandono del proceso de captación de agua subterránea ha hecho que los vecinos perciban un aumento en la frecuencia anual de inundaciones.

El impacto de las precipitaciones intensas, principalmente en la cuenca baja del arroyo Dupuy (Laferrere Sur) se manifiesta en dos escalas temporales diferentes: la de la inundación debida a la crecida propia del Dupuy, y la del desborde del río Matanza. Estas situaciones, de temporalidad diferente dado el tamaño de las cuencas, pueden llegar a darse simultáneamente e incluso a verse agravadas por la ocurrencia de una Sudestada como lo fue durante noviembre de 2014. En la percepción de los vecinos de Laferrere Sur, las crecidas del arroyo Dupuy aumentaron su frecuencia durante los últimos años.

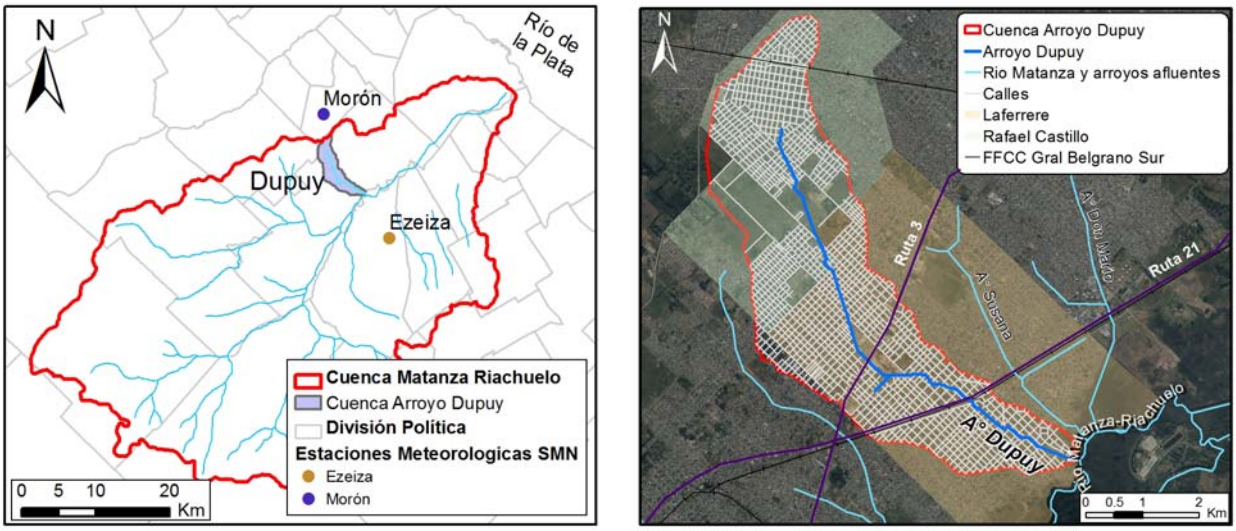

Figura 1.- Localización de Laferrere y la cuenca del Arroyo Dupuy.

Luego de la inundación del 7 de febrero del 2014 en Laferrere, un grupo de los inundados de ese evento decidió movilizarse realizando un corte en la Ruta 21 a la altura del arroyo Dupuy con el objetivo de hacer visible el problema. Esa acción resultó ser la primera del grupo Vecinos Autoconvocados del Arroyo Dupuy. Este grupo, básicamente movilizado en torno al objetivo de la ejecución de obras hídricas en la cuenca, utilizó distintas estrategias comunicacionales entre las que se destacaron la apertura de una cuenta en Facebook y la emisión semanal de un programa de radio (Figura 2). Con más de 20 inundaciones ocurridas durante el año 2014, la problemática logró ser difundida, incluso llegando a medios de comunicación masivos durante los eventos más graves.

Otra de las tareas realizadas por el grupo fue la de registrar eventos de inundación ocurridos posteriormente, relevando algunas variables y fotografiando zonas inundadas para luego divulgarlas en su cuenta de Facebook (Figura 2).

Figura 2.- Vecinos Autoconvocados del Arroyo Dupuy: a) participación en redes sociales (Facebook), b) participación en radio (Emisora Santiago y Copla, AM1120)

La estrategia de generar información cuantitativa a partir de las observaciones generadas durante y después de cada inundación amplía la posibilidad de tener modelos que permitan una mejor representación de estos fenómenos. En cuencas no instrumentadas, las marcas de agua y los registros de referentes locales referidos a inundaciones se constituyen como los únicos elementos para contrastar resultados de modelación. Las fuentes de información sobre inundaciones durante la situación pre-instrumental de las cuencas corresponden a referencias históricas, artículos en los diarios, marcas de agua en edificios y registros fotográficos (Melo *et al*., 2014; Kjeldsen *et al*., 2014; Roggenkamp y Herget, 2014). Históricamente, la búsqueda de este tipo de información ha tenido que ver con la extensión de series de observaciones hacia el pasado con el objetivo de mejorar el análisis de frecuencia de inundaciones (Pekárová et al., 2013). Según Kjeldsen *et al*. (2014), el valor de la información histórica sobre inundaciones está generalmente reconocido, pero que aún se observan limitaciones acerca de cómo incorporar esos datos al análisis de riesgo. En la actualidad, la reconstrucción de variables de la inundación adopta formas novedosas como en el caso de Le Boursicaud *et al*. (2016), en donde se estiman caudales a partir de nuevas tecnologías (*LS-PIV – Large Scale Particle Image Velocimetry* – a partir de videos de inundaciones subidos a YouTube). La cuenca del arroyo Dupuy se encuentra en el periodo pre-instrumental, por lo que se acepta como válida la información de inundaciones generada por los propios inundados para evaluar la consistencia de modelos hidrológico-hidráulicos.

La frecuencia y magnitud de los eventos de precipitación ocurridos y la gran cantidad de afectados, motivó un estudio de la dinámica del agua en esta cuenca, con la idea de aportar en el desarrollo de herramientas útiles para la implementación de medidas no estructurales en la mitigación de las inundaciones. Para analizar la dinámica del agua en la cuenca, se implementó un modelo numérico hidrológico-hidráulico con el objetivo de tener un mejor conocimiento de los impactos de estos eventos, utilizando información generada por los inundados para validar el modelo.

MODELO HIDROLÓGICO-HIDRÁULICO DEL ARROYO DUPUY

Software utilizado

La modelación hidrológica–hidráulica de la cuenca del arroyo Dupuy se realizó con el software *EPA-SWMM* (*Environmental Protection Agency, EEUU - Storm Water Management Model*). EPA-SWMM permite simular el proceso de transformación de lluvia en escorrentía, continuo o por eventos, calculando la cantidad y la calidad de escorrentía, principalmente en cuencas urbanas (Rossman, 2009). El código del EPA-SWMM, ampliamente utilizado en hidrología urbana, está estructurado en tres módulos que interactúan entre sí para representar el comportamiento del sistema hídrico: i) Módulo de Escorrentía (RUNOFF); ii) Módulo de Transporte (EXTRAN); y iii) Módulo de Calidad del Agua. La implementación de un modelo con EPA-SWMM significa constituir una serie de elementos interconectados, que representan individualmente partes del sistema hidrológico e hidráulico (pluviómetros, subcuencas, nodos, conducciones, orificios y vertederos).

Como herramienta de pre-procesamiento y post-procesamiento se utilizó el software de desarrollo propio *ConuPy* (Lecertua *et al*., 2014). Éste consiste en una colección de rutinas codificadas en Python que permiten captar información geográfica desarrollada en un entorno SIG (Sistema de Información Geográfica) y construir de manera automática el esquema discreto para la modelación en EPA-SWMM, incluyendo la red de subcuencas, nodos y conexiones superficiales y subterráneas. Para el presente estudio, *ConuPy* permitió, entre otras cosas, representar la red completa de calles existente en la cuenca, sin necesidad de imponer simplificaciones a priori. Entre los datos georreferenciados requeridos por *ConuPy* se encuentran la red de arroyos y de calles, el modelo digital del terreno (MDT), la cuenca de análisis y su punto de salida, y mapas de precipitaciones, de impermeabilidad y de pendientes.

Implementación del modelo

La cuenca en estudio prácticamente carece de conducciones que pertenezcan a un sistema de desagües pluviales, por lo tanto para el módulo hidráulico solo se consideró el transporte de los excedentes a través del arroyo Dupuy y en superficie por las calles.

El arroyo Dupuy, de 9,4km de longitud (con 96% de desarrollo a cielo abierto), fue representado con secciones trapeciales, de 3,0 m de ancho de solera y entre 1,5 m y 2,0 m de altura, con el agregado de planicies de inundación estimadas a partir del análisis de imágenes satelitales, fotografías y visitas al lugar. Para esto se subdividió en tramos al arroyo, adoptando distintas características de planicie de inundación. El coeficiente de rugosidad (*n de Manning*) adoptado para el arroyo fue de 0,04 teniendo en cuenta la vegetación, los restos orgánicos e inorgánicos presentes en el curso, y la multiplicidad de obras de arte.

La ubicación georreferenciada, y el ancho y longitud de las calles fueron obtenidos de la cartografía digital que fue utilizada en el Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010 en la provincia de Buenos Aires (http://www.ec.gba.gov.ar/Estadistica/censo2010/cartografia.html). Se adoptó una sección transversal con la forma de la calzada, con una altura del cordón de 0,20 m, al mismo nivel del centro de la calzada y un

ancho de vereda de 2 m. Las calles se unieron mediante nodos de tipo u*nidad de almacenamiento*, ya que estos elementos permiten una mejor representación de la inundación a partir de una correcta descripción del almacenamiento en superficie. Los nodos de esquina aledaños al arroyo se conectaron a este mediante vertederos, con un ancho igual al de la calle y un coeficiente de descarga de 3,0. En tanto, las esquinas próximas al tramo entubado se conectaron mediante sumideros, representados como orificios/vertederos de 0,15 m de alto y 2 m de ancho. En la Tabla 1 se presenta la cantidad de elementos modelados en el sistema.

Tabla 1.- Cantidad de elementos modelados.

Elemento	Cantidad
Subcuencas	2.284
Nodos	2.289
Tramos de conducciones	3.505
Orificios	9
Vertederos	132

El modelo digital del terreno (MDT) se construyó a partir de las curvas de nivel generadas cada 1,25 m de altitud por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) (Figura 3 a). La interpolación de las curvas de nivel, a celdas de 10 m de lado, se realizó con la herramienta *Topo To Raster* de *ArcGis*, basada en el software ANUDEM y diseñada para crear modelos digitales del terreno para uso hidrológico a partir de información de curvas de nivel (Hutchinson *et al*., 2011).

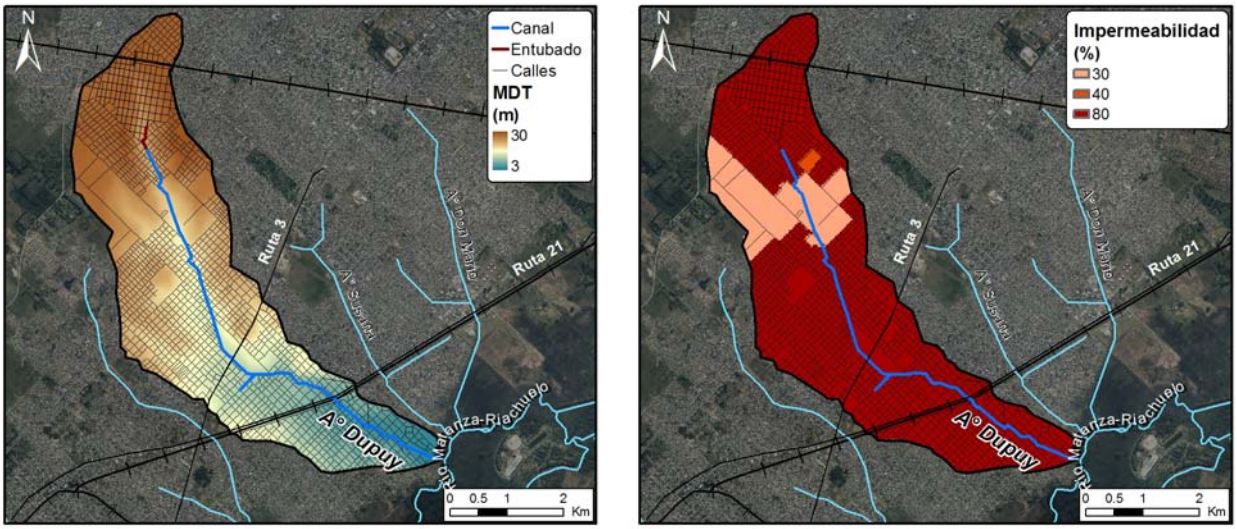

Figura 3.- Datos necesarios para la implementación del modelo hidrológico-hidráulico utilizando el ConuPy: red de calles y arroyos, modelo digital del terreno (a) y mapa de impermeabilidad de la cuenca (b).

El módulo hidrológico requiere la discretización de la superficie de la cuenca en *subcuencas*, las cuales al ser sometidas a un evento de precipitación generan excedentes superficiales. Dada las facilidades que ofrece el sistema automatizado de generación del esquema de modelación, se optó por utilizar una discretización muy fina de la cuenca, creando una subcuenca alrededor de cada nodo de la red de conducción, en particular una

subcuenca por cada esquina. Estas cuencas pequeñas son particularmente apropiadas para el tratamiento lluvia-escorrentía utilizado por EPA-SWMM. Este tratamiento tiene la ventaja adicional de introducir los excedentes de manera distribuida en la red de conducción y además permite una representación sencilla de tormentas no uniformes o de celdas con movimiento.

El modelo lluvia-escorrentía trata cada subcuenca como un depósito no lineal, incluyendo infiltración sobre su fracción permeable. Para modelar esta última se adoptó el método de infiltración de Horton, con tasas máximas y mínimas de 50 mm/hr y 2 mm/hr, respectivamente y una tasa de decaimiento de 2 hr^{-1} para los sectores permeables del área urbanizada (UNLP, 2013), y 100 mm/hr y 10 mm/hr con una tasa de decaimiento de 5 hr^{-1} en los sectores permeables del área no urbanizada. Los excedentes de escorrentía desde los sectores permeable e impermeable de la subcuenca pueden fluir hacia otro sector, o ambos pueden drenar directamente hacia la salida de la subcuenca. En este trabajo, dado el reducido tamaño de las subcuencas, se asumió que todos sus excedentes se descargan directamente al nodo más cercano. El modelo genera escorrentía cuando es superado el valor de profundidad de las depresiones, en este trabajo se buscó maximizar escorrentía considerando nulas estas profundidades.

El porcentaje de impermeabilidad en cada zona de la cuenca se estimó a partir de imágenes satelitales. Por simplicidad se distinguieron tres niveles de impermeabilidad (Figura 3 b): para las zonas urbanizadas se estimó un valor de 80%, para la zona de descampados un 30% y para algunas zonas de loteos incipientes un 40%.

El módulo de escorrentía requiere en cada subcuenca un parámetro de ancho medio, un volumen de abstracción inicial, rugosidades de Manning y una pendiente media. Para estimar el ancho medio se utilizó en cada subcuenca la relación entre su área y la longitud de conducciones superficiales que la atraviesan. En este trabajo no se incluyeron volúmenes de abstracción inicial, ni para las zonas permeables ni para las impermeables. Como rugosidades de Manning se adoptaron coeficientes de 0,025 para las zonas impermeables y 0,050 para las zonas permeables. La pendiente media de cada subcuenca se calculó a partir del modelo digital de terreno, resultando valores en el rango 1,10 % - 0,02 %.

Las simulaciones fueron realizadas con el modelo de onda dinámica, utilizando un paso de discretización temporal de 10 segundos con la posibilidad de variarlo hasta 0,5 segundos. Para reducir el costo computacional de cada simulación, se utilizó la estrategia numérica de extensión de las conducciones cortas, en donde el cumplimiento de la condición de Courant exige demasiado al paso temporal. Las simulaciones resultaron ser del orden de los 5 minutos para una ventana temporal de 2 días.

VALIDACION

Elementos de validación

La validación del modelo se realizó en tres etapas considerando las distintas fuentes de información disponibles: i) registros fotográficos de áreas inundadas (a partir de los cuales se estimaron niveles de agua en calle), y ii) una caracterización de cada evento sufrido durante 2014 (información detallada vinculada a la permanencia del agua, volumen precipitado, los niveles alcanzados y un orden de gravedad del evento de acuerdo a la percepción de los afectados).

Cada una de las etapas apunta a dar validez a la modelación en distintos aspectos y variables:

a) validación general de la zona crítica de la cuenca: a partir de fotografías de impacto de precipitaciones ocurridas durante el año 2015 se buscó que el modelo represente bien la zona de mayor frecuencia de inundación;
b) validación de un caso particular simulando la tormenta del 7 de febrero de 2014: se compararon alturas de inundación en sitios puntuales estimadas a partir de fotografías de la fecha.
c) validación general de alturas y duración de inundación (eventos del año 2014): se compararon alturas y duración de inundación en dos zonas de la cuenca baja para los mismos eventos.

En general el acuerdo es bueno en las tres etapas, permitiendo contar con una primera versión de un modelo de la cuenca para ser utilizado con diferentes objetivos.

Validación general de zona crítica (eventos año 2015)

En esta etapa de validación, en base a imágenes de diferentes eventos del 2015, se buscó determinar los sitios de ocurrencia de inundación más frecuentes. En la Tabla 2 se presentan los eventos para los cuales se registraron imágenes de la inundación, junto con los datos de precipitaciones de las estaciones más cercanas, la condición del río Matanza (ocurrencia o no de sudestada), y la cantidad de calles inundadas fotografiadas.

Tabla 2.- Eventos con imágenes de inundación durante el año 2015.

Fecha	**Días con lluvia del evento**	**Precipitación total [mm]**		**Sudestada**	**Calles inundadas fotografiadas**
		Ezeiza SMN	Morón SMN	Río de la Plata SHN	
31/07/2015	30 y 31 de julio	54,8	54,0	NO	2
09/11/2015	9 de noviembre	24,0	15,0	NO	4
17/11/2015	16 y 17 de noviembre	38,0	37,0	NO	6
27/11/2015	26 y 27 de noviembre	52,0	65,0	NO	9

Con esta información, publicada en la cuenta de Facebook de los Vecinos del Arroyo Dupuy, se construyó una base de datos de 11 calles diferentes con distinta frecuencia de inundación (en función de los eventos registrados) que llevada a un mapa muestra la zona crítica respecto del impacto. Este mapa sirvió para

validar la modelación comparándolo con las manchas de inundación simuladas a partir de escenarios representativos de los eventos con registros. En la Figura 4 se muestra el mismo sector de la cuenca inundado, para distintos eventos.

Para las simulaciones, los eventos con registros fotográficos se caracterizaron con una precipitación total de 20 mm (9/11), 40 mm (17/11) y 60 mm (31/7 y 27/11), y una intensidad constante de 20 mm/hr ya que se registró que las precipitaciones fueron de corta duración.

Figura 4.- Inundación del mismo sector para distintos eventos: Chassaing entre Garcia Merou y Salvigny.

La simulación del evento de precipitación total de 20 mm (9/11) no presentó desborde del arroyo Dupuy (probablemente la intensidad haya sido mayor, en la misma cuenta de Facebook se menciona que esa lluvia fue intensa durante 15 minutos). Los dos restantes ensayos sí presentan desborde del arroyo, con una mayor área inundada por la precipitación de 60 mm. Por lo tanto se adoptó al hietograma de 40 mm como representativo de situaciones de inundación del arroyo Dupuy para precipitaciones no extremas. En la Figura

5 se comparan la mancha de inundación simulada con la localización de las calles inundadas con registro fotográfico. Se observa que el acuerdo es bueno en la representación general de la zona crítica de la cuenca al impacto de la inundación.

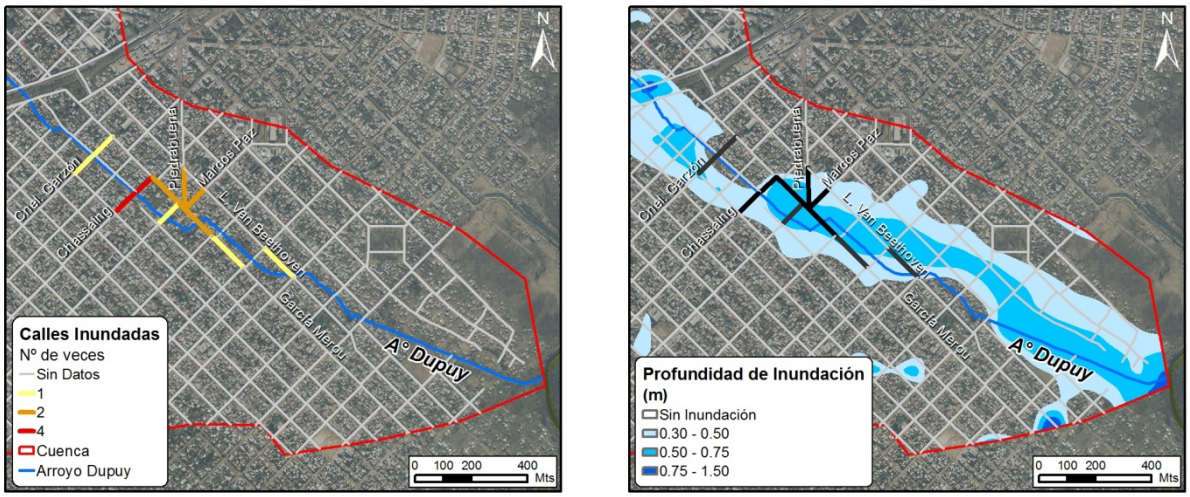

Figura 5.- Calles recurrentemente inundadas de Laferrere Sur y mancha de inundación simulada.

Validación de la simulación del 7 de febrero de 2014

El impacto de la precipitación del 7 de febrero fue catalogado por los habitantes de Laferrere como el de mayor gravedad de los ocurridos durante 2014. El hietograma de precipitación utilizado para esta etapa de validación corresponde a las observaciones de la estación FCA-UNLZ del Instituto de Clima y Agua del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (ICyA - INTA) localizada en el predio de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad de Lomas de Zamora a unos 15,0 km del baricentro de la cuenca. A pesar de disponer información de estaciones más cercanas a escala diaria (Ezeiza a 11,8 km y Morón a 7,7 km), se eligió este conjunto de datos debido a la mayor desagregación temporal asumiéndolo como representativo de lo ocurrido en Laferrere.

Posteriormente a la ocurrencia de ese evento, en la cuenta de Facebook de los Vecinos del Arroyo Dupuy se publicaron dos fotografías en lugares diferentes (Cinco Esquinas, y Ruta 21 y arroyo Dupuy) de las cuales se pudieron estimar alturas niveles de inundación. En la Figura 6 se presenta el mapa de niveles máximos alcanzados simulados y las alturas estimadas y calculadas para cada uno de los puntos. Estos últimos valores se presentan consistentes demostrando una buena aproximación de la modelación.

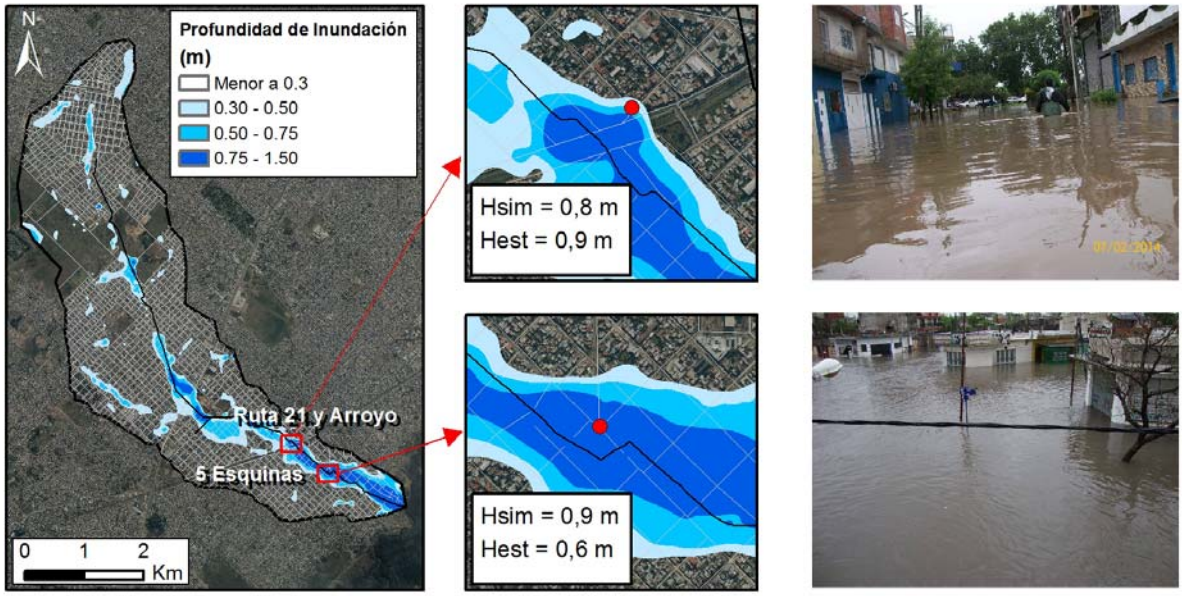

Figura 6.- Inundación del 7 de febrero de 2014. Validación de la modelación.

Validación general de alturas y duración de inundación (eventos del año 2014)

Uno de los elementos de registro de inundaciones de los Vecinos del Arroyo Dupuy consiste en un resumen de todos los eventos ocurridos durante 2014 conformando un total de 17 eventos independientes. De cada uno de ellos se detalla la siguiente información: fecha de inundación, hora en que desbordó el arroyo Dupuy, duración de la inundación, altura de agua estimada en la zona adyacente a la Estación Laferrere, altura de agua estimada en la zona adyacente al río Matanza, una caracterización de cada evento con menciones a volumen precipitado, intensidad y duración, y un orden de gravedad del evento de acuerdo a la percepción de los afectados. Parte de esta información se resume en la Figura 7, en donde se puede observar gran parte de la información recolectada por los inundados (fecha de inundación, altura del agua estimada en cercanías de la Estación Laferrere y el río Matanza y duración de la inundación), junto con la precipitación acumulada de dos días observada por el Servicio Meteorológico Nacional en las estaciones Ezeiza y Morón, y con la indicación de los cinco eventos de mayor gravedad.

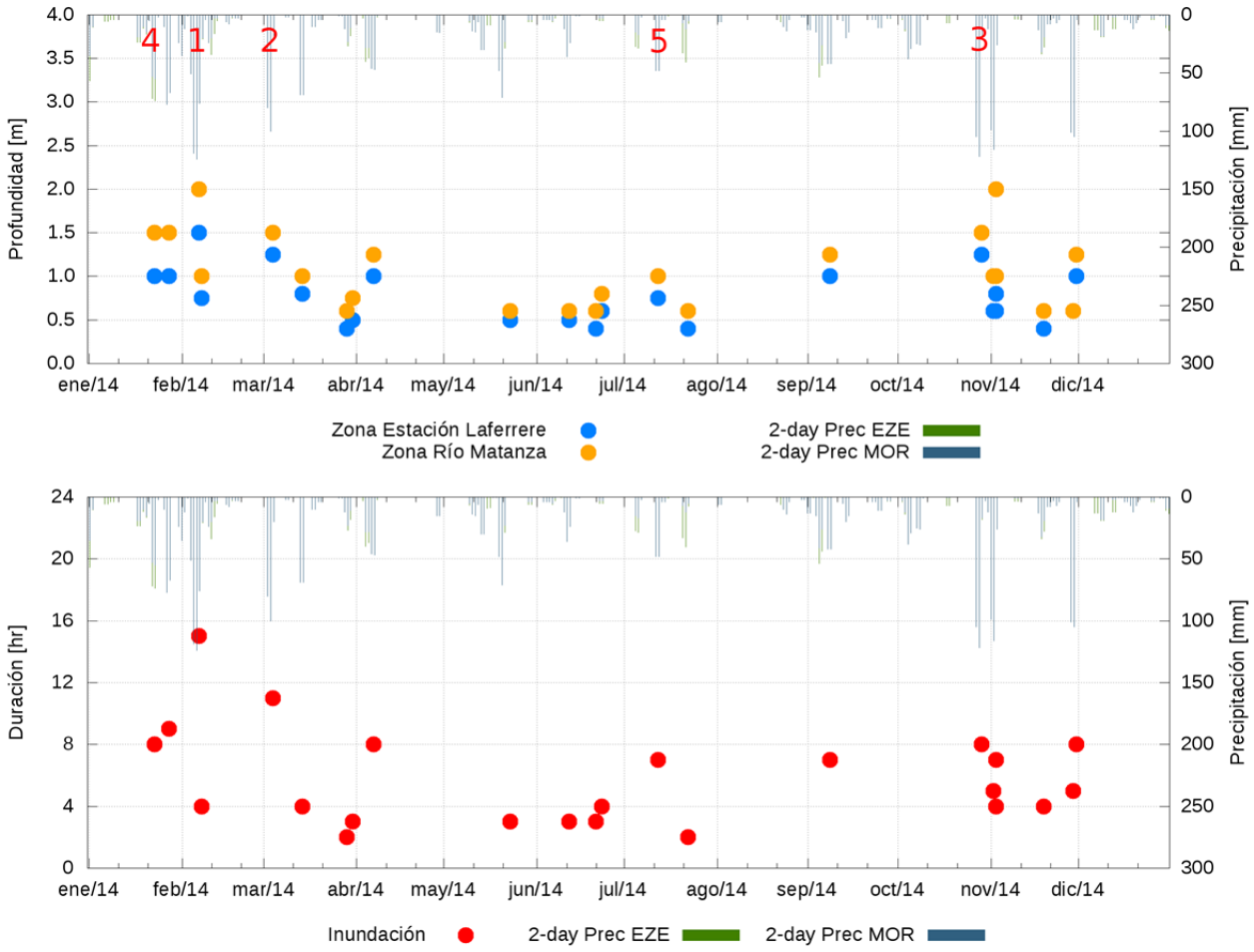

Figura 7.- Eventos de inundación registrados por los inundados durante 2014.

En la Tabla 3 se detalla la información registrada de los cinco eventos más graves según la percepción de los inundados, observaciones que se complementan con datos medidos que se presentan en la Tabla 4.

Tabla 3.- Los cinco peores eventos de 2014 (registros de los inundados).

Orden de gravedad	Fecha	Altura de inundación [m]		Duración de inundación [hr]	Observaciones
		Estación Laferrere	Río Matanza		Percepción de inundados
1	07/02/2014	1,50	2,00	15	*Lluvia de 200 mm en 7 horas, la peor inundación.*
2	04/03/2014	1,25	1,50	11	*Lluvias muy intensas: 120 mm.*
3	29/10/2014	1,25	1,50	8	*150 mm caídos. Muy grave.*
4	23/01/2014	1,00	1,50	8	*Calor intenso. Gran cantidad de agua caída en 3 horas.*
5	12/07/2014	0,75	1,00	7	*Mucha agua caída. Raro por ser pleno invierno.*

Tabla 4.- Datos para los eventos identificados como los cinco peores de 2014.

Orden de gravedad	Fecha	2-día Precipitación [mm]		Sudestada	Días con lluvia
		Ezeiza SMN	Morón SMN	Río de la Plata SHN	
1	07/02/2014	80,0	124,0	NO	5, 6, 7 y 8 feb
2	04/03/2014	49,9	100,0	NO	3 y 4 mar
3	29/10/2014	92,0	122,0	SI (max 2,97 m MOP)	28 y 29 oct
4	23/01/2014	73,8	55,0	NO	23 ene
5	12/07/2014	43,2	48,0	NO	12 jul

En esta etapa de validación se buscó que el modelo de una buena respuesta respecto de los cinco eventos más graves según la consideración de los afectados. Como el de mayor gravedad se simuló en el apartado anterior (7 de febrero de 2014), la simulación de los cuatro eventos restantes se simplificó de acuerdo a los volúmenes precipitados en las dos estaciones de referencia, adoptando precipitaciones totales de 60 mm (cuarto y quinto), 90 mm (segundo) y 120 mm (tercero) (Tabla 4) con intensidades medias de 30 mm/hr. En el caso del evento con sudestada (tercero) se impuso un nivel de aguas abajo constante en el río Matanza de 4 m IGN, mientras que en el resto se fijó una altura constante de 3 m IGN.

En la Figura 8 se muestran las comparaciones de alturas y duración de inundaciones registradas y simuladas. Los niveles, tanto en la zona de la Estación Laferrere como en cercanías del río Matanza muestran un buen acuerdo respecto de lo registrado. En el caso de las duraciones el acuerdo no es tan bueno, por un lado por limitación de no conocer la distribución de intensidades de precipitación de estos registros y por otro, en el caso de la mayor diferencia, por el desconocimiento acerca de la simultaneidad de la tormenta con la sudestada.

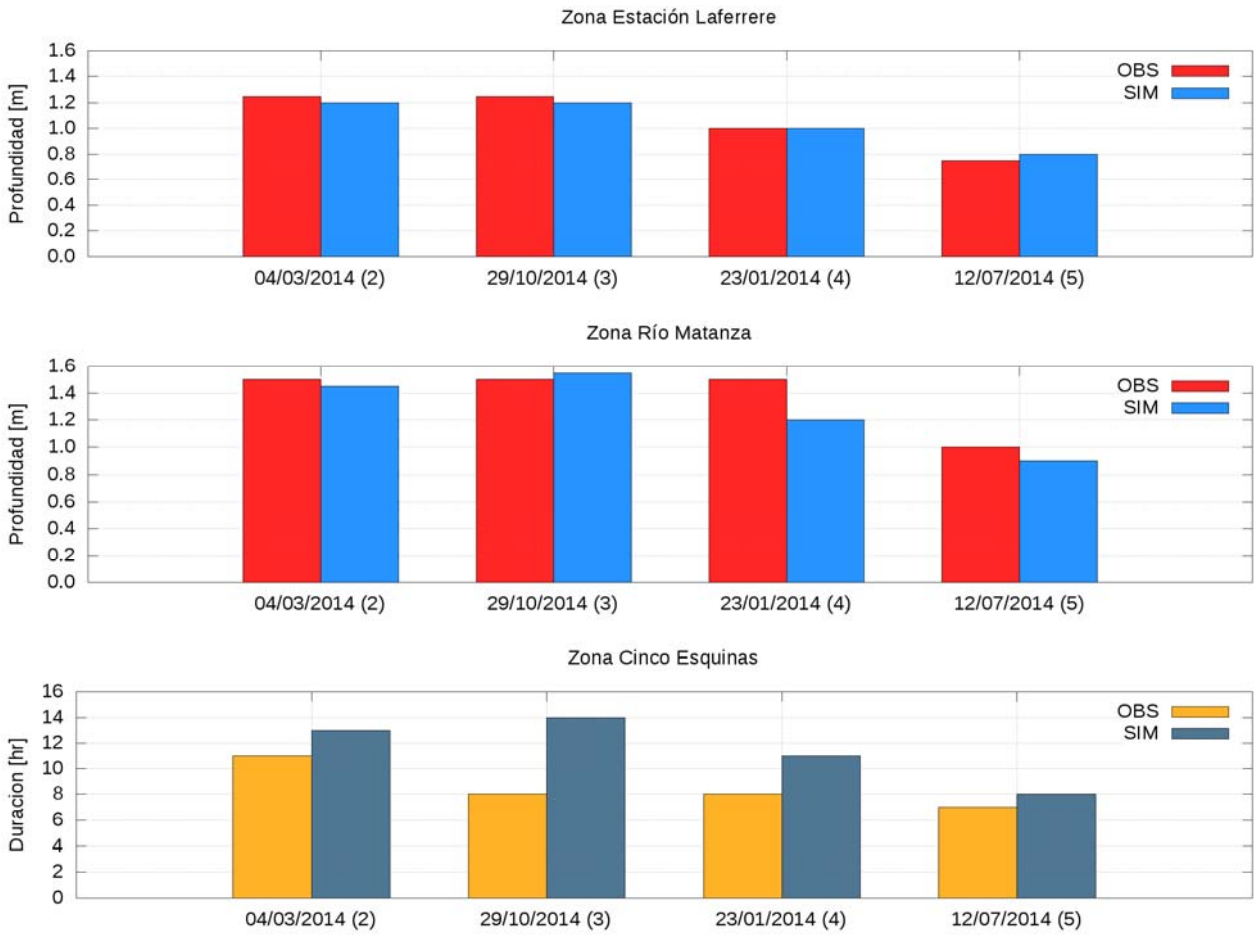

Figura 8.- Alturas y duración de inundaciones registradas y simuladas.

EXPLOTACIÓN DEL MODELO

Un modelo validado implica la posibilidad de respuesta de distintas preguntas respecto de la cuenca simulada. A modo de ejemplo, se analiza en este apartado el impacto de la misma tormenta del 7 de febrero de 2014 ante distintos escenarios en el punto de descarga (nivel en el río Matanza). Otro tipo de inquietudes que permitiría responder el modelo serían aquellas relacionadas con el impacto de la variabilidad espacial y temporal de las tormentas, el impacto del avance de la urbanización en la cuenca (aumento de calles asfaltadas) o con las dificultades que presenta la obstrucción generada por residuos sólidos durante una crecida en los distintos puentes que atraviesan el arroyo.

Aceptando como nivel medio del río Matanza en la desembocadura del Dupuy al valor de 3 m IGN, se analizó el impacto de la misma tormenta pero con niveles mayores en ese punto (4 m y 5 m IGN), implicando la ocurrencia de sudestada (ordinaria y extraordinaria respectivamente). En la Figura 9 se presentan, además del hietograma las alturas de inundación para los tres escenarios en el sitio crítico de la cuenca (Cinco Esquinas) la evolución temporal de la altura de inundación.

En la comparación del escenario de la situación normal del río Matanza y con el de una sudestada ordinaria, se observa que el impacto en Cinco Esquinas es similar. Mientras que ante la ocurrencia de una sudestada extraordinaria, se mantienen los niveles máximos alcanzados por la inundación pero aumenta su duración.

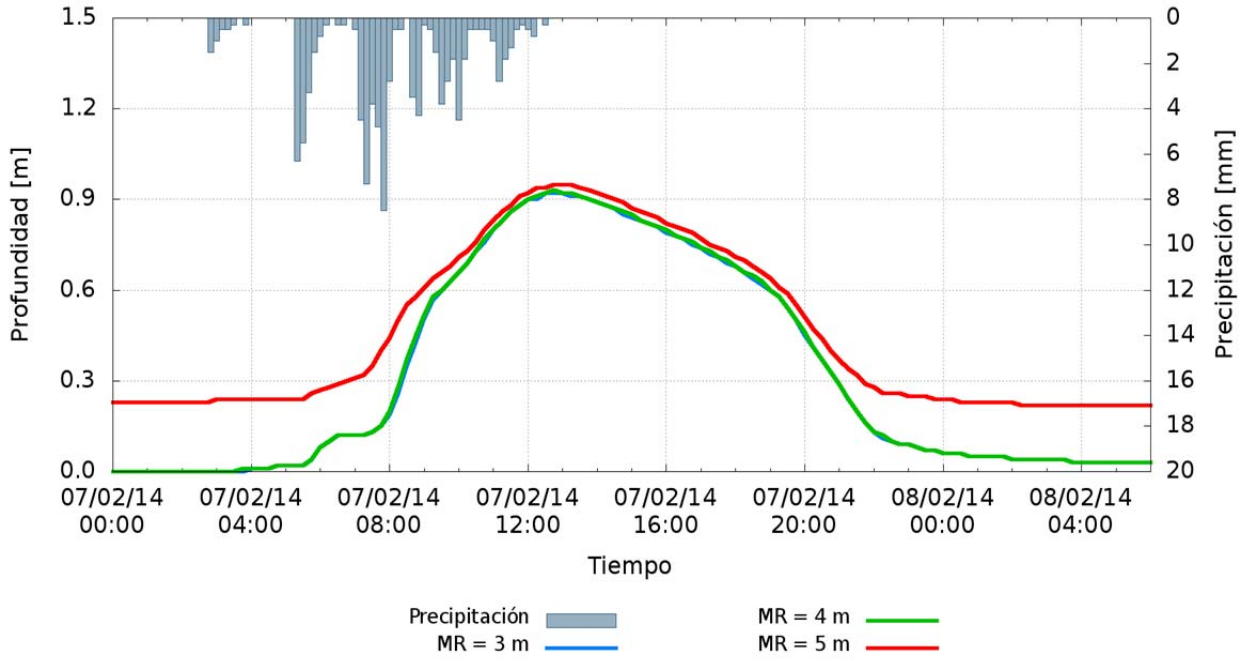

Figura 9.- Altura de inundación simulada en Cinco Esquinas para tres condiciones de nivel en el borde de aguas abajo (río Matanza: 3 m, 4 m y 5 m IGN).

CONCLUSIONES

Actualmente, la posibilidad de implementar modelos hidrológico-hidráulicos de cuencas urbanas de detalle (con una buena representación de las precipitaciones, la topografía y las conducciones) permite una mejor aproximación en la detección de las áreas críticas y en la evaluación de los impactos de las inundaciones.

Necesariamente estos modelos requieren de una adecuada calibración y validación. Ante la ausencia de observaciones en las cuencas simuladas (reglas hidrométricas, aforos, etc.), resulta indispensable acudir a información indirecta que permita una caracterización de la inundación: registros de los propios inundados e información de los medios de comunicación y las redes sociales. La vinculación de la modelación con este tipo de datos y con los inundados enriquece la herramienta, permitiendo una mejor explotación de la misma, de cara a la mitigación del problema.

El hecho de contar con un modelo hidrológico-hidráulico de una cuenca urbana validado implica la posibilidad de respuesta de distintas preguntas respecto del impacto de eventos plausibles u ocurridos. En el caso de estos últimos, si la modelación es acompañada de registros del caso, la reconstrucción del impacto de la inundación puede constituirse como una herramienta de análisis importante para la gestión del riesgo de la

cuenca. Los resultados de este trabajo que se destacan como elementos necesarios para pensar un sistema de alerta temprana en esta cuenca los constituyen la determinación con buena precisión de las zonas críticas (cuadras) y la temporalidad del avance de una crecida según la condición del cuerpo de agua receptor (Matanza-Riachuelo).

Agradecimientos. *Este trabajo fue realizado en el marco del proyecto de extensión 'Anticipando la crecida' (Exactas con la Sociedad 5, FCEyN – UBA) y los proyectos de investigación 'Inundaciones en cuencas urbanas: comprender la dinámica del agua para contribuir a la implementación de medidas no estructurales' (PIDDEF 41 2014-2017) y 'Modelación numérica para la gestión de riesgo por precipitaciones extremas en cuencas urbanas' (UBACyT 2016-2019, 20020150200213BA). Un agradecimiento especial a los Vecinos del Arroyo Dupuy por generar y compartir este tipo de información.*

REFERENCIAS

Kjeldsen, T., y otros, 2014. Documentary evidence of past floods in Europe and their utility in flood frequency estimation. Journal of Hydrology, 517, 963-973.

Hutchinson, M.F., Xu, T., Stein, J.A., 2011. Recent Progress in the ANUDEM Elevation Gridding Procedure. En: Geomorphometry 2011, edited by T. Hengel, I.S. Evans, J.P. Wilson and M. Gould, pp. 19–22. Redlands, California, USA.

Le Boursicaud, R., Pénard, L., Hauet, A., Thollet, F., Le Coz, J., 2016. Gauging extreme floods on YouTube: application of LSPIV to home movies for the post-event determination of stream discharges. Hydrological Processes, 30 (1), 90–105.

Lecertua, E.A., Kazimierski, L.D., Re, M., Badano, N.D., y Menéndez, A.N., 2014. Modelación hidrológica - hidráulica de la cuenca Sarandí - Santo Domingo ante un evento de precipitación extrema. IFRH 2014, 2do. Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos. Instituto Nacional del Agua, Ezeiza, Argentina.

Melo, M., Pekárová P., Miklánek, P., Melová K., Dujsíková, C., 2014. Use of historical sources in a study of the 1895 floods on the Danube River and its tributaries. Geographica Pannonica, 18 (4), 108-116.

Pekárová, P., Halmová, D., Mitková, V.B., Miklánek, P., Pekár, J., Škoda, P., 2013. Historic flood marks and flood frequency analysis of the Danube River at Bratislava, Slovakia. J. Hydrol. Hydromech., 61 (4), 326–333.

Roggenkamp, T., Herget, J., 2014. Reconstructing peak discharges of historic floods of the river Ahr, Germany. Erdkunde, 68 (1), 49-59.

Rossman, L.A., 2009. Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0. EPA/600/R-05/040, National Risk Management Research Laboratory. United States Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.

Universidad Nacional de La Plata (UNLP), 2013. Estudio sobre la Inundación ocurrida los días 2 y 3 de abril de 2013 en las ciudades de La Plata, Ensenada y Berisso. Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ingeniería, Departamento de Hidráulica.